

LE A, N° 340.
° D'ORDRE
1003.

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES,

PAR

M. G. GUTTON.

Ancien élève de l'École Normale Supérieure,
Agrége de Physique.

- 1^{re} THÈSE.** — RECHERCHES EXPÉRIMENTALES SUR LE PASSAGE DES ONDES
ÉLECTRIQUES D'UN CONDUCTEUR A UN AUTRE.
2^e THÈSE. — PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Soutenues le **23** juin 1899, devant la Commission d'Examen

MM. TROOST, *Président.*

LIPPMANN, {
POINCARÉ, { *Examineurs.*

PARIS.

GAUTHIER-VILLARS, IMPRIMEUR-LIBRAIRE

DU BUREAU DES LONGITUDES, DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE,
Quai des Grands-Augustins, 55.

1899

SÉRIE A, N° 340.

N° D'ORDRE

1003.

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES,

PAR

M. GUTTON.

Ancien élève de l'École Normale Supérieure.

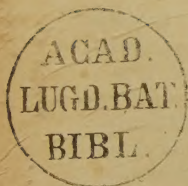
1^{re} THÈSE. — RECHERCHES EXPÉRIMENTALES SUR LE PASSAGE DES ONDES
ÉLECTRIQUES D'UN CONDUCTEUR A UN AUTRE.

2^e THÈSE. — PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Soutenues le **23** juin 1899, devant la Commission d'Examen.

MM. TROOST, *Président.*

LIPPMANN, }
POINCARÉ, } *Examineurs.*



PARIS,

GAUTHIER-VILLARS, IMPRIMEUR-LIBRAIRE

DU BUREAU DES LONGITUDES, DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE,
Quai des Grands-Augustins, 55.

1899

UNIVERSITÉ DE PARIS.

FACULTÉ DES SCIENCES DE PARIS.

	MM.	
Doyen.....	DARBOUX, Professeur....	Géométrie supér.
Professeur honoraire.....	HERMITE.	
	DE LACAZE-DUTHIERS..	Zoologie, Anatomie, Physiol. comparée.
	TROOST.....	Chimie.
	LIPPMANN.....	Physique.
	HAUTEFEUILLE.....	Minéralogie.
	BOUTY ...	Physique.
	APPELL.....	Mécanique rationn.
	DUCLAU.....	Chimie biologique.
	BOUSSINESQ.....	Calcul des probabi- lités, Physique ma- thématique.
	PICARD.....	Analyse supérieure et Algèbre supér.
	POINCARÉ.....	Astronomie mathé- matique et Méca- nique céleste.
Professeurs.....	YVES DELAGE.....	Zoologie, Anatomie, Physiol. comparée.
	BONNIER.....	Botanique.
	DASTRE.....	Physiologie.
	DITTE.....	Chimie.
	MUNIER-CHALMAS	Géologie.
	GIARD.....	Zoologie, Évolution des êtres organisés.
	WOLF.....	Astronomie phys.
	KOENIGS.....	Mécanique physique et expérimentale.
	VÉLAIN.....	Géographie phys.
	GOURSAT.....	Calcul différentiel et Calcul intégral.
	N.....	Chimie organique.
	CHATIN.....	Zoologie, Anatomie, Physiol. comparée.
Professeurs adjoints.....	PELLAT.....	Physique.
	PUISEUX.....	Mécanique et Astro- nomie.
Secrétaire.....	FOUSSEREAU.	

A

MESSIEURS BICHAT & BLONDLLOT,

PROFESSEURS A L'UNIVERSITÉ DE NANCY.

PREMIÈRE THÈSE.

RECHERCHES EXPÉRIMENTALES

SUR

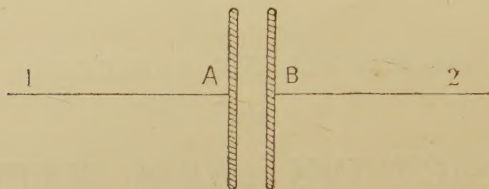
LE PASSAGE DES ONDES ÉLECTRIQUES

D'UN CONDUCTEUR A UN AUTRE.

Lorsque les ondes électriques, qui se propagent le long d'un fil métallique, arrivent à l'extrémité, elles se réfléchissent, mais si, dans le prolongement de ce fil, on entend un second et que l'on réunisse les extrémités en regard A et B (*fig. 1*) à chacune des armatures d'un condensateur, les ondes sont transmises, en partie, au second fil et continuent à se propager dans le même sens. Le dispositif est analogue à celui que l'on emploie pour faire agir par influence électrostatique un conducteur sur un autre, mais cette analogie n'est que dans le dispositif expérimental et les lois de l'électrostatique ne peuvent suffire pour rendre compte de la transmission des ondes du fil primaire au fil secondaire. D'autre part, il semble très difficile d'étudier le phénomène, en recherchant un système d'intégrales des six équations de Hertz et d'obtenir ainsi, sans le secours de l'expérience, la distribution des forces électrique et magnétique.

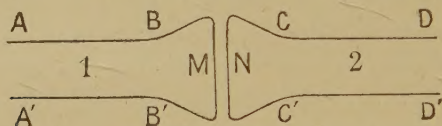
Pour ces raisons, je me suis proposé de déterminer expérimentalement quelles sont les relations entre la phase, l'amortissement et l'intensité d'un train d'ondes primaires et du train d'ondes transmis au fil secondaire par l'intermédiaire d'un condensateur.

Fig. 1.



Il y a encore une autre manière de faire passer les ondes d'un fil à un autre. La ligne primaire est formée de deux fils parallèles AB , $A'B'$ (*fig. 2*) reliés aux deux pôles d'un excitateur. Les extrémités des fils sont réunies par un pont BMB' . Une ligne secondaire CD , $C'D'$ identique à la

Fig. 2.



ligne primaire est tendue dans le prolongement de celle-ci. Le pont CNC' , qui réunit les extrémités des fils secondaires, est parallèle au pont qui ferme la ligne primaire.

Comment s'effectue ici le passage des ondes d'une ligne à l'autre ? C'est ce que j'ai étudié dans la seconde Partie de ce travail.

La disposition qui permet de transmettre les ondes rappelle celle qui sert à produire les courants d'induction. Toutefois, il n'est pas certain, *a priori*, que l'on puisse appliquer ici les lois expérimentales de l'induction élec-

tromagnétique. Les courants induits sont, en effet, produits par une force électromotrice longitudinale, tandis que, dans le cas des oscillations hertziennes, la force électrique est normale aux surfaces conductrices.

Il y a donc encore lieu de recourir à l'expérience pour étudier les relations entre les ondes primaires et les ondes transmises à la ligne secondaire.

J'ai été, en outre, conduit à étudier quelques autres dispositions permettant de faire passer des ondes d'un conducteur à un autre, puis à faire quelques expériences sur le cas où le conducteur secondaire est un résonateur.

Ces recherches ont été faites au laboratoire de Physique de la Faculté des Sciences de Nancy.

Je dois de vifs remerciements à M. Bichat et à M. Blondlot, dont les nombreux conseils m'ont été d'un grand secours, et je suis heureux de leur assurer ma profonde reconnaissance et ma respectueuse affection.

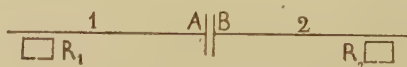
PREMIÈRE PARTIE.

PASSAGE DES ONDES DE L'EXTRÉMITÉ D'UN FIL PRIMAIRE A L'EXTRÉMITÉ D'UN FIL SECONDAIRE TENDU DANS LE PROLONGEMENT DU PREMIER.

Lorsque des ondes électriques, qui se propagent le long d'un fil métallique, arrivent à l'extrémité de ce fil, elles reviennent en arrière et parcourent le fil en sens inverse; mais si, dans le prolongement de ce fil, on en tend un second et que l'on réunisse les extrémités en regard A et B (*fig.* 3) aux deux armatures d'un condensateur de faible capacité, les ondes passent en partie sur ce second fil et continuent à se propager. Pour le constater, il suffit

de placer l'un des côtés d'un résonateur R_2 parallèlement au fil, on aperçoit des étincelles à la coupure de ce résonateur. De plus, si l'on déplace un résonateur R_1 le long

Fig. 3.

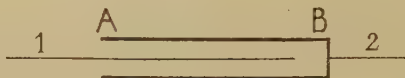


du premier fil, l'étincelle passe par une série de maxima et de minima, qui révèlent l'existence d'une onde réfléchie à l'extrémité A de ce fil. Les ondes primaires se dédoublent donc bien en donnant naissance à des ondes secondaires et à des ondes réfléchies.

I. — PHASE DES ONDES SECONDAIRES.

Afin de transmettre les ondes du fil primaire au fil secondaire, j'ai employé tout d'abord la disposition suivante : le fil primaire pénètre dans un tube de laiton AB (*fig. 4*) suivant la direction de l'axe et se termine à l'in-

Fig. 4.

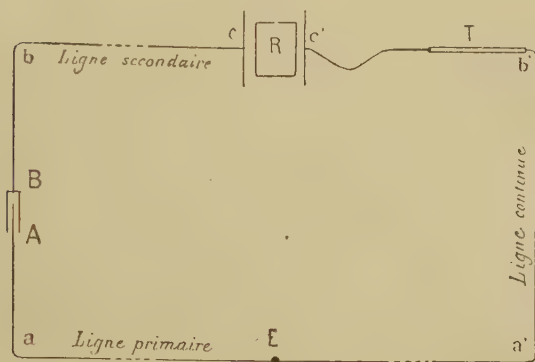


térieur. L'une des extrémités du tube est fermée; elle est soudée à l'extrémité du fil secondaire. Le tube et le fil intérieur constituent un condensateur cylindrique par l'intermédiaire duquel les ondes passent d'un conducteur à l'autre. J'ai d'abord cherché si ce passage était accompagné d'un *changement de phase*.

Du même pôle E (*fig. 5*) d'un excitateur partent deux systèmes d'ondes, l'un se propage d'abord le long de la ligne primaire EaA , puis passe à la ligne secondaire Bbc ; l'autre système est transmis par un fil continu $Ea'b'c$, dont on peut faire varier la longueur. La ligne continue

et la ligne secondaire aboutissent respectivement au milieu de deux tiges de cuivre parallèles à deux côtés opposés d'un résonateur rectangulaire R. Si les ondes arrivent en concordance de part et d'autre de ce résonateur, leurs effets se retranchent, ce qui fait disparaître l'étincelle à la coupure. Les deux systèmes d'ondes partent en concor-

Fig. 5.

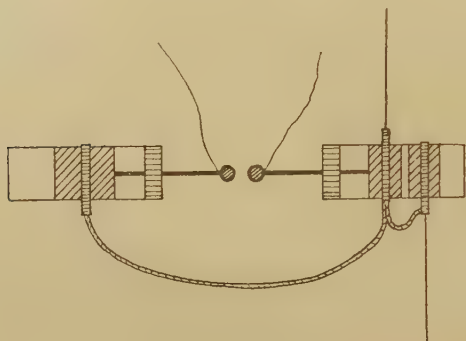


dance du même pôle de l'excitateur : l'un parcourt un fil continu, l'autre doit, durant son trajet, passer d'un fil à un autre; si ce passage n'est accompagné d'aucun changement de phase, on devra observer l'extinction de l'étincelle du résonateur lorsque les chemins parcourus par chacun des systèmes d'ondes ont la même longueur; si, au contraire, il se produit un changement de phase, on pourra rétablir la concordance des ondes en allongeant le fil continu d'une longueur équivalente à ce changement de phase.

L'excitateur était formé de deux bouteilles de Leyde, construites en collant, à l'intérieur et à l'extérieur de deux gros tubes de verre de 5^{cm} de diamètre intérieur et de 0^{cm}, 2 d'épaisseur, des anneaux de papier d'étain, qui, dans la plupart des expériences, avaient environ 2^{cm} de large,

Les armatures internes communiquent chacune avec l'une des deux boules entre lesquelles jaillit l'étincelle excitatrice. Ces deux boules sont reliées aux deux pôles d'une bobine de Ruhmkorff. Pour permettre aux bouteilles de se charger, les armatures externes sont réunies par une corde mouillée. L'une de ces armatures est formée de deux parties distinctes auxquelles sont attachées les extré-

Fig. 6.



mités de chacune des lignes le long desquelles il faut produire des ondes. Ces ondes partent alors simultanément et en concordance de l'excitateur et, l'armature étant double, les deux lignes n'ont entre elles aucune communication métallique.

J'ai employé différents résonateurs formés d'un fil recourbé en carré ou en rectangle; celui qui m'a servi le plus souvent était un carré de 50^{cm} de côté en fil de cuivre de 3^{mm}.

Le tube, qui servait à transmettre les ondes d'un fil à un autre, avait 20^{cm} de long et 2^{cm} de diamètre, le fil primaire pénétrait jusqu'aux $\frac{3}{4}$ de sa longueur.

La longueur totale de la ligne primaire et de la ligne secondaire était de 13^m, 70.

Afin de pouvoir faire varier la longueur de la ligne con-

tinue, j'ai intercalé sur son trajet un tube de laiton T (fig. 5) de $1^m,30$ de longueur et de $0^{cm},2$ de diamètre intérieur et une tige de cuivre qui glisse à frottement dans l'intérieur, de sorte qu'on peut, en tirant plus ou moins la tige hors du tube, allonger à volonté le chemin que doivent parcourir les ondes pour arriver au résonateur. La longueur de la ligne continue était de $13^m,70$ quand la tige était à moitié enfoncée dans le tube.

Pour déterminer la longueur qu'il faut donner à la ligne continue pour que les ondes arrivent en concordance au résonateur, j'opère de la manière suivante : la tige étant complètement tirée hors du tube, je rentre lentement la tige dans le tube, de façon à diminuer la longueur de la ligne jusqu'à ce que les étincelles s'éteignent à la coupure du résonateur. Puis, les ayant rallumées en continuant à rentrer la tige dans le tube, je les éteins à nouveau en tirant la tige hors du tube. Par un réglage convenable de la coupure, on arrive à obtenir les deux extinctions pour des longueurs de la ligne qui diffèrent de moins de 10^{cm} ; la moyenne de ces longueurs sera, à 5^{cm} près environ, la longueur que doit avoir le fil continu pour que les ondes qui se propagent le long des deux branches de l'appareil arrivent en concordance au résonateur.

Il n'est pas absolument nécessaire d'établir l'accord entre le résonateur et l'excitateur; toutefois, on obtient des extinctions plus nettes si l'on se rapproche de cet accord en suspendant au résonateur, de part et d'autre de la coupure, des feuilles de papier d'étain, auxquelles on donne, par tâtonnements, une surface convenable.

J'ai déterminé, comme je viens de l'indiquer, la longueur de la ligne continue, pour laquelle les ondes qui ont suivi cette ligne et celles qui ont, durant leur trajet, passé du fil primaire au fil secondaire arrivent en concordance au résonateur. En mesurant alors les longueurs des chemins parcourus par chacun des systèmes d'ondes depuis

l'excitateur jusqu'au résonateur, je les ai trouvées égales. On peut donc en conclure que le passage des ondes de l'extrémité du fil primaire à l'extrémité du fil secondaire, par l'intermédiaire d'un tube et d'un fil concentrique, s'effectue sans *changement de phase*.

Comme vérification, j'ai enlevé le tube constituant l'armature externe du condensateur qui sert à transmettre les ondes d'un fil à l'autre et j'ai réuni les extrémités de ces deux fils par un bout de fil métallique dont la longueur était égale à la distance qui, dans l'expérience précédente, séparait l'extrémité du fil primaire du fond du tube.

Les ondes ont alors à parcourir le même trajet mais sans passer d'un fil à un autre. J'ai trouvé que la longueur de l'autre branche de l'appareil pour laquelle les deux systèmes d'ondes arrivent en concordance au résonateur était la même que dans la première expérience.

Lorsque l'une des lignes est discontinue, l'intensité de l'onde secondaire est moindre que celle de l'onde qui se propage le long de la ligne continue; les actions sur le résonateur sont inégales, ce qui rend les interférences incomplètes et l'extinction de l'étincelle difficile à observer. Pour remédier à cet inconvénient, il suffit de déplacer un peu le résonateur de façon à rapprocher celui de ses côtés sur lequel agissent les ondes les moins intenses du fil qui amène ces ondes, ce qui éloigne en même temps du fil, qui amène les ondes les plus intenses, le côté opposé. On peut ainsi compenser les inégalités d'intensité des ondes. Cette raison m'a fait préférer l'emploi d'un résonateur à l'observation des étincelles qui peuvent jaillir entre les extrémités des deux lignes et qui sont aussi minima quand les deux ondes arrivent en concordance.

J'ai fait d'autres expériences dans le but de reconnaître s'il se produit un changement de phase lors du passage des ondes d'un fil à un autre, en me servant cette fois pour conduire les ondes de *deux* fils parallèles issus chacun de

l'un des pôles de l'excitateur, ce qui présente des avantages. Le champ électromagnétique créé autour d'un fil unique n'est pas localisé très près de ce fil; les lignes de force électrique qui ont l'une de leurs extrémités à sa surface vont finir soit sur les parois du laboratoire, soit sur les conducteurs qui y sont placés; il en résulte des perturbations dans la propagation des ondes et des actions des différentes parties de l'appareil l'une sur l'autre. Ces perturbations rendent plus difficile l'observation des extinctions de l'étincelle. Pour qu'elles n'acquiescent pas une valeur notable, on est obligé de restreindre la longueur des fils qui servent à la propagation des ondes; or il est préférable d'employer des fils très longs, afin d'éviter que les ondes qui sont réfléchies à l'extrémité des fils ne reviennent, après une seconde réflexion, sur l'excitateur, en se mélangeant aux ondes que celui-ci émet encore.

Si, au contraire, les ondes se propagent le long de deux fils parallèles issus des deux pôles de l'excitateur, tous ces inconvénients disparaissent. Les lignes de force électrique sont, en effet, rassemblées entre les deux fils, puisqu'elles doivent aboutir à deux points en regard pris sur ces fils. On évite alors plus facilement l'influence des parois de la chambre et les actions des différentes parties de l'appareil l'une sur l'autre, ce qui m'a permis de donner aux lignes le long desquelles se propagent les ondes une plus grande longueur. Les ondes parcouraient 52^m entre l'excitateur et le résonateur.

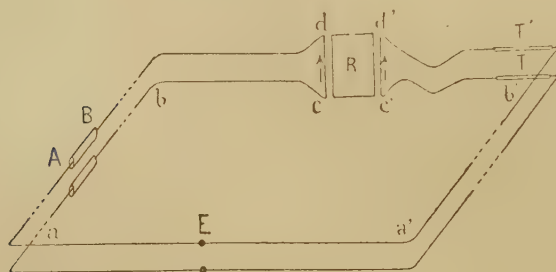
La disposition expérimentale et la manière d'opérer sont analogues à celles que j'ai adoptées dans les expériences faites sur des ondes qui se propagent le long d'un fil unique.

Des deux pôles d'un excitateur EE' (*fig. 7*) partent :

1° La ligne primaire EaA . Chacun des deux fils se termine en A dans l'intérieur d'un tube de laiton identique à celui qui m'a servi dans les expériences faites avec un

seul fil. Ces tubes sont soudés à l'extrémité de chacun des fils secondaires et forment avec le fil intérieur les condensateurs qui servent à transmettre les ondes à ces fils. La ligne secondaire $Bbcd$ se termine par un pont cd parallèle à l'un des côtés du résonateur rectangulaire R .

Fig. 7.



2° Une ligne continue $Ea'b'c'd'$ se termine à un pont $c'd'$ parallèle au côté opposé du résonateur, de telle sorte que si les ondes qui parcourent les ponts cd et $c'd'$ sont concordantes, elles produisent sur le résonateur des effets inverses. Deux tubes de laiton TT' , dans lesquels glissent des tiges de cuivre, sont intercalés sur chacun des fils et permettent de les allonger ou de les raccourcir simultanément.

L'écartement des deux fils de chaque ligne était de $0^m,10$. Ces fils étaient des fils de cuivre de 1^{mm} . La ligne primaire avait 25^m de long et la ligne secondaire 27^m . L'excitateur, le résonateur et les tubes qui permettent de faire varier la longueur de la ligne continue étaient à l'intérieur du laboratoire, mais les fils sur leur plus grande longueur étaient tendus dans une cour. Ils sortaient par de petits trous percés dans les fenêtres et étaient supportés à $1^m,60$ du sol par des poteaux de bois munis d'isolateurs en faïence.

J'ai employé tantôt l'excitateur formé de deux bouteilles

de Leyde que j'ai déjà décrit, tantôt des excitateurs du système de M. Blondlot. Les longueurs d'ondes de ces derniers ont été mesurées comme il sera indiqué plus loin et trouvées égales à $22^m,40$ et $10^m,80$. Il faut remarquer que, dans ces expériences destinées à constater la concordance de phase de deux systèmes d'ondes électriques, il y a intérêt à ne pas employer des ondes courtes. L'erreur absolue que l'on commet en observant cette concordance est presque aussi grande si les ondes sont courtes, mais la fraction de longueur d'onde correspondant à cette erreur sera d'autant plus petite que les ondes seront plus longues.

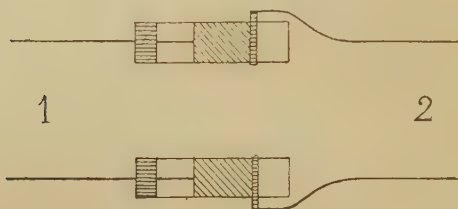
Je détermine d'abord la longueur de la ligne continue pour laquelle l'onde qui a suivi cette ligne et l'onde secondaire arrivent en concordance au résonateur. J'enlève ensuite les tubes qui servent à transmettre les ondes des fils primaires aux fils secondaires, je réunis entre elles les extrémités en regard de ces fils, puis je détermine à nouveau la longueur de l'autre branche de l'appareil pour laquelle les ondes arrivent en concordance. J'ai trouvé que les deux longueurs ainsi déterminées sont égales, ce qui prouve que l'onde passe *sans changement de phase* des fils primaires aux fils secondaires par l'intermédiaire de tubes soudés aux fils secondaires et dans lesquels pénètrent les fils primaires sans toucher les parois.

J'ai recommencé les expériences en intervertissant les rôles du tube et du fil concentrique, j'ai soudé le tube à l'extrémité du fil primaire et y ai fait pénétrer le fil secondaire. Les ondes étaient encore transmises sans changement de phase.

Le tube et le fil intérieur forment une sorte de bouteille de Leyde de très faible capacité. On peut se demander si, lorsque la capacité électrostatique du condensateur que pourraient former les surfaces en regard des conducteurs primaire et secondaire est grande, il n'y

a pas un retard dans la transmission des ondes. Afin de résoudre cette question, j'ai construit des bouteilles de Leyde en collant à l'intérieur et à l'extérieur de tubes de verre mince des anneaux de papier d'étain. L'extrémité du fil primaire pénètre suivant l'axe du tube et communique par de petites lames de laiton flexibles avec l'armature interne (fig. 8); l'extrémité du fil secondaire est en

Fig. 8.



communication avec l'armature externe par l'intermédiaire d'une bande de laiton qui entoure l'armature. Je me sers de deux bouteilles de Leyde, identiques pour transmettre les ondes de chacun des fils primaires au fil secondaire correspondant. J'ai employé successivement deux paires de bouteilles construites avec des tubes de 1^{cm},35 de diamètre extérieur et de 0^{cm},06 d'épaisseur; les longueurs des armatures étaient, pour les unes, de 4^{cm}, pour les autres, de 1^{cm},8. Leurs capacités étaient environ $6,5 \times 10^{-5}$ et 3×10^{-5} microfarad. Je montrerai plus loin que les plus grandes de ces bouteilles transmettaient complètement les ondes primaires aux fils secondaires. Les ondes sont encore transmises *sans changement de phase*. Si l'on répète l'expérience en retournant les bouteilles de Leyde de façon que l'armature externe soit reliée au fil primaire, les ondes sont également transmises sans aucun changement de phase.

Il résulte donc, des expériences précédentes, que les

ondes sont transmises sans changement de phase, quelle que soit la capacité électrostatique des bouteilles de Leyde qui servent à faire passer les ondes de l'extrémité du fil primaire à l'extrémité du fil secondaire.

On peut remarquer que c'est plutôt pour une faible capacité qu'on aurait pu s'attendre à un changement de phase, puisque, pour une capacité *infinie*, c'est-à-dire lorsque le fil est le fil continu, il n'y en a aucun.

II. — FORME DES LIGNES DE FORCE DU CHAMP HERTZIEN DANS LA RÉGION OU LES ONDES QUITTENT LE CONDUCTEUR PRIMAIRE POUR PASSER A LA SURFACE DU CONDUCTEUR SECONDAIRE.

Une onde le long d'un fil est constituée par des lignes de force électrique rectilignes, normales au fil, dont l'une des extrémités se propage à la surface du fil et l'autre sur les parois de la chambre où se fait l'expérience. Je supposerai, pour plus de simplicité, que cette chambre est une très grande chambre métallique dont les parois sont partout loin du fil.

On peut se faire une idée des formes que doivent prendre les lignes de force électrique dans la région où l'onde passe de l'extrémité du fil primaire à l'extrémité du fil secondaire par l'intermédiaire d'un tube soudé au fil secondaire et suivant l'axe duquel pénètre, sans toucher les parois, le fil primaire (*fig. 9*).

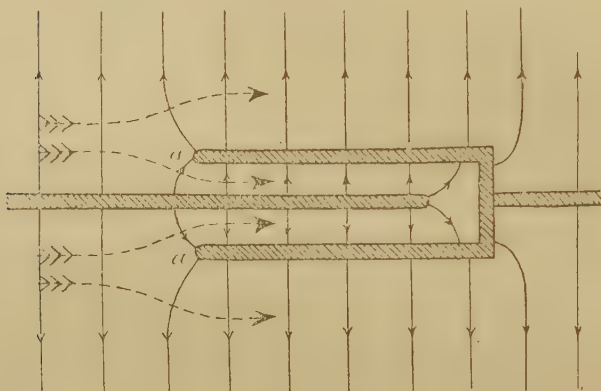
Les lignes de force sont assujetties à plusieurs conditions. Dans le cas d'oscillations très rapides, la force électrique est normale aux conducteurs ⁽¹⁾, les lignes de force doivent donc toujours aboutir normalement aux surfaces conductrices.

L'expérience m'a montré que les ondes étaient trans-

(¹) H. POINCARÉ, *Les oscillations électriques*, page 60.

mises sans changement de phase du fil primaire au fil secondaire. Une ligne de force devra donc avoir, à partir du fil secondaire, le même sens qu'elle avait à partir du fil primaire, car, si le passage d'un fil à l'autre renversait le sens de la force électrique, ce renversement équivaldrait à un changement de phase d'une demi-période.

Fig. 9.



Une ligne de force électrique ne peut finir brusquement dans le milieu diélectrique; il en résulte que, si l'une de ses extrémités se propage sur un conducteur, elle ne peut le quitter tout à coup. Les extrémités des lignes de force qui se propagent sur les parois de la chambre ne peuvent donc les quitter; celles qui se propagent à la surface du conducteur primaire y resteront aussi, sans pouvoir sauter à la surface du conducteur secondaire.

La formation de l'onde secondaire s'explique alors par le tracé suivant qui s'impose en vertu des conditions à remplir. Les lignes de force électrique de l'onde primaire, en arrivant à l'orifice du tube, se présentent tangentielle-ment à la surface métallique qui constitue le bord (a) de cet orifice. Les lignes de force devant être normales aux surfaces métalliques se couperont et chacune des extré-

mités, ainsi rendue libre, aboutira normalement à la surface du tube. Ces extrémités sont de signe contraire et se propagent l'une à l'intérieur, l'autre à l'extérieur du tube de sorte que, de part et d'autre du bord (a) de l'orifice, la force électrique a des directions inverses. Il est alors nécessaire que la force électrique soit nulle au point (a).

A partir de la région où les lignes de force se coupent les ondes primaires donnent naissance à deux systèmes d'ondes distincts; l'un correspond aux lignes de force qui passent à l'extérieur du tube et aboutissent, d'une part, aux parois de la chambre, d'autre part, à la surface du tube. Ces lignes de force rejoignent le fil secondaire et constituent les ondes transmises à ce fil sans changement de phase.

L'autre système d'ondes correspond aux lignes de force qui aboutissent, d'une part, à la surface intérieure du tube, d'autre part, au fil primaire; ces lignes de force reviennent en arrière après avoir atteint l'extrémité du fil primaire et constituent l'onde réfléchie.

Les lignes de force magnétique restent constamment des cercles, dont les plans sont normaux à la direction commune des fils primaire et secondaire et qui ont leurs centres sur l'axe de ces fils. Ces cercles coupent normalement le plan de la figure. D'après la théorie de Poynting (¹), l'énergie électromagnétique se propage en un point d'un champ hertzien suivant la normale au plan déterminé par les directions des forces électrique et magnétique. Pour tous les points du plan de la figure, la direction de propagation de l'énergie est dans ce plan et les lignes suivant lesquelles elle se propage sont les trajectoires orthogonales des lignes de force électrique.

(¹) POYNTING, *Sur la transmission de l'énergie dans le champ électromagnétique* (*Phil. Trans. of the Royal Soc. of London*, t. CLXXV, p. 343; 1884. *Archives de Genève*, t. XXII, p. 214; 1889).

Dans la région (*a*) les lignes d'énergie se séparent en deux faisceaux, dont l'un passe à l'extérieur du tube et correspond à l'onde secondaire et dont l'autre passe à l'intérieur et correspond à l'énergie qui, après avoir atteint l'extrémité du fil primaire, revient en arrière.

J'ai établi, *a priori*, le tracé des lignes de force électrique en cherchant à satisfaire aux résultats de l'expérience et aux conditions théoriques générales que doivent remplir les lignes de force d'un champ hertzien. Le tracé obtenu fait prévoir, à la surface du conducteur secondaire, une ligne le long de laquelle la force électrique est nulle; j'ai cherché à mettre en évidence, par l'expérience, l'existence de cette ligne, afin d'obtenir une vérification de l'exactitude de la figure. Une petite boule de verre, dans laquelle on a fait le vide de Geissler, s'illumine lorsqu'elle se trouve dans un champ hertzien suffisamment intense. J'ai utilisé ce phénomène pour avoir des indications sur l'intensité de la force électrique aux différents points du champ. Les ampoules de verre dont je me suis servi avaient environ 1^{cm} de diamètre. Pour que ce diamètre ne fût pas trop grand par rapport aux dimensions du tube qui servait à faire passer les ondes d'un fil à l'autre, je me suis servi d'un gros tube en laiton de 7^{cm} de diamètre intérieur et de 55^{cm} de long; j'ai remplacé l'extrémité du fil primaire par une tige en laiton de 2^{cm} de diamètre et de 70^{cm} de long, qui pénétrait suivant l'axe du tube sur une longueur de 50^{cm}. Des ondes très intenses étaient produites par un excitateur de M. Blondlot, ayant 2^m de diamètre.

Les ondes se propageaient le long de deux fils parallèles de 50^m de long, puis atteignaient deux tubes identiques, placés parallèlement à 0^m,20 l'un de l'autre, qui transmettaient les ondes aux deux fils d'une ligne secondaire de 55^m de long. J'explorais la région située entre les deux tubes, où le champ est le plus intense et où la forme des

lignes de force au voisinage des surfaces métalliques présente les mêmes particularités que lorsque les ondes se propagent le long d'un fil unique.

J'ai remarqué que si l'on déplace la boule de verre vide le long de la surface du tube, elle s'illumine partout, sauf au moment où, en la faisant passer de l'extérieur à l'intérieur du tube, on l'amène en face du bord de l'orifice de ce tube. L'illumination de la boule cesse donc bien dans la région où, le tracé des lignes de force fait prévoir que la force doit être nulle. Pour réussir cette expérience il faut construire un certain nombre de boules de verre vides parmi lesquelles on choisit celles dont la sensibilité est convenable.

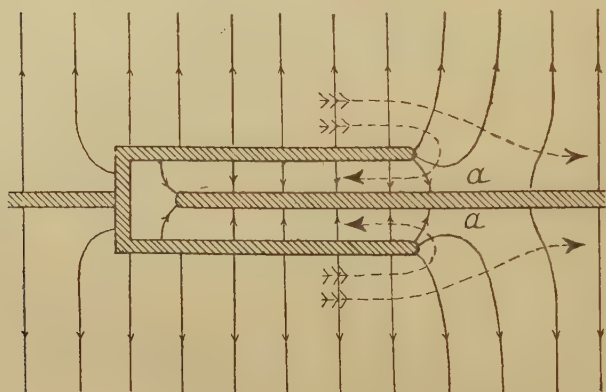
L'expérience m'a montré que si, au lieu d'être relié au fil secondaire, le tube est soudé au fil primaire, tandis que le fil secondaire sort suivant son axe (*fig. 10*), les ondes sont également transmises d'un fil à l'autre sans changement de phase.

En s'aidant des mêmes considérations que dans le cas précédent on peut trouver la forme des lignes de force électrique. Les lignes de force constituant l'onde primaire arrivent ici par l'extérieur du tube, l'une de leurs extrémités contourne le bord de l'orifice, tandis que l'autre extrémité se propage sur les parois de la chambre. Il arrive alors nécessairement que les lignes de force s'incurvant de plus en plus se présentent tangentiellement au conducteur secondaire dans une région (*a*), située un peu en avant de l'orifice du tube. Dans cette région, les lignes de force se coupent en deux parties qui se raccordent normalement à la surface du conducteur secondaire; celles qui constituent l'onde secondaire continuent à se propager sans que le sens de la force ait été modifié; les autres pénètrent à l'intérieur du tube, puis reviennent en arrière et forment l'onde réfléchie le long du fil primaire.

De part et d'autre de la région (*a*), la force électrique,

à la surface du conducteur secondaire, a des directions inverses; il y a donc dans cette région une ligne où la force électrique est nulle. Les lignes d'énergie qui sont les trajectoires orthogonales des lignes de force électrique se séparent dans la région (α) en deux faisceaux dont l'un correspond à l'onde secondaire, tandis que si l'on suit sur

Fig. 10.

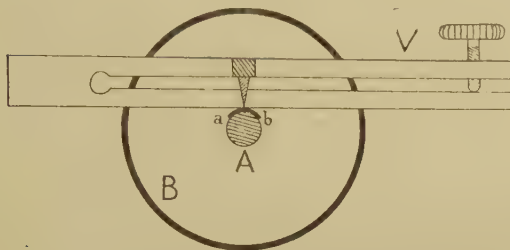


la figure les lignes d'énergie correspondant aux lignes de force intérieures du tube, on voit que les ondes, après avoir atteint l'extrémité du fil secondaire, reviennent en arrière et rejoignent la surface extérieure du tube, puis le fil primaire; les lignes de force électrique qui, après leur division en deux faisceaux, pénètrent à l'intérieur du tube correspondent donc à l'onde réfléchie.

En se servant pour transmettre les ondes d'un fil à l'autre du gros tube en laiton et de la tige intérieure que j'ai décrits, et en déplaçant dans le champ une petite boule de verre vide, on peut constater l'existence de la région où la force électrique est nulle. Si l'on déplace la boule de verre le long de la tige secondaire, à partir de l'orifice du tube l'illumination diminue, puis s'éteint pour reparaître de nouveau lorsqu'on continue à s'éloigner le long du fil secondaire.

On peut, dans le cas présent, vérifier d'une autre manière l'existence des points de force électrique nulle. Les étincelles que l'on peut tirer d'un conducteur en approchant de sa surface une petite pointe métallique isolée doivent être plus courtes aux points où la force électrique est nulle au moment du passage du maximum de l'onde. Je place contre la tige secondaire A (*fig. 11*) qui sort du tube primaire B un fragment de lame de laiton, *ab*, recourbé cylindriquement et s'appliquant bien sur la surface de la tige de manière à se substituer à celle-ci comme un plan d'épreuve se substitue à la surface d'un corps

Fig. 11.



électrisé. Normalement à cette lame est disposée une pointe, *p*, en laiton ayant environ 0^m,01 de longueur. Afin de pouvoir régler la distance de la pointe à la petite lame, cette dernière est collée avec de la gomme laque à l'une des branches d'une longue pince en bois, tandis que la pointe est collée à un morceau d'ébonite fixé à l'autre branche. On peut écarter les deux branches de la pince au moyen d'une vis, *V*. Je place d'abord la petite lame sur la tige secondaire, assez loin de l'orifice du tube, et règle la vis de manière à obtenir de petites étincelles entre la lame et la pointe. Je déplace ensuite la lame et la pointe, le long de la tige secondaire, en tenant la pince par l'extrémité, de façon à ne pas favoriser les étincelles par l'approche de la main. Une fois le réglage fait, on voit les étincelles s'éteindre lorsque la pointe arrive un peu en

avant de l'orifice du tube, ces étincelles se rallument lorsqu'on continue à s'en approcher. La disparition des étincelles un peu en avant de l'orifice du tube met en évidence l'existence de la région de force électrique nulle que le tracé des lignes de force faisait prévoir.

Ce procédé ne peut servir dans le premier cas, où la ligne de force électrique nulle est sur le bord du tube, parce que la courbure de la surface métallique de ce bord varie trop rapidement pour qu'il soit possible de déplacer la petite lame de laiton en la maintenant constamment bien appliquée contre la surface.

En résumé, les ondes sont transmises sans changement de phase du fil primaire au fil secondaire; on peut trouver un tracé des lignes de force électrique, qui s'impose en raison des conditions à remplir et rend compte de ce résultat. Ce tracé permet de faire prévoir que *les ondes passent au conducteur secondaire, par l'intermédiaire de régions où la force électrique à la surface de ce conducteur est nulle* et l'on peut obtenir une vérification de l'exactitude des formes assignées *a priori* aux lignes de force en montrant expérimentalement l'existence de ces régions où la force électrique est nulle.

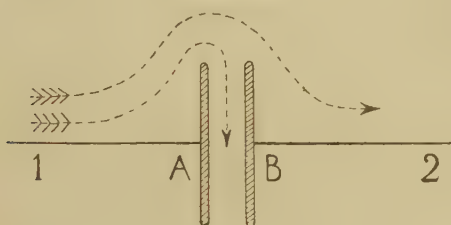
III. — ÉTUDE DE QUELQUES DISPOSITIONS EXPÉRIMENTALES QUI PERMETTENT DE TRANSMETTRE LES ONDES AU FIL SECONDAIRE.

1° *Transmission des ondes par l'intermédiaire de deux plaques parallèles.* — J'ai répété les expériences d'interférence déjà décrites en me servant, pour faire passer les ondes d'un fil à l'autre, de deux plaques métalliques circulaires, dont les plans sont parallèles entre eux et perpendiculaires à la direction commune des fils primaire et secondaire (*fig. 12*). Les extrémités de ces fils sont soudées au centre de chacun des deux plateaux.

J'ai comparé les ondes transmises au fil secondaire par

ces deux plaques avec les ondes qui parcourent le même fil lorsque, ces plaques étant enlevées, les extrémités A et B des fils primaire et secondaire sont directement réunies par un bout de fil métallique. J'ai trouvé que l'onde transmise par les plaques était en retard d'une longueur un peu supérieure au diamètre des plaques. Ce retard subsistait encore quand on rapprochait les plaques jusqu'à les amener en contact.

Fig. 10.



Voici la valeur des retards pour des expériences faites sur des ondes qui se propagent le long d'un fil unique, au moyen de la disposition que j'ai décrite au début de ce travail.

Diamètre des plaques.	Plaques		
	au contact.	écartées de 2 ^{cm} .	écartées de 0 ^{cm} , 8.
m	m	m	m
0,18.....	0,21	0,21	0,23
0,23.....	0,33	0,30	0,32
0,35.....	0,45	0,43	0,48

Ce Tableau montre que les ondes secondaires ne sont pas en retard sur les ondes qui passeraient si les plaques se touchaient, puisque les écarts entre les nombres d'une même ligne ne sont pas supérieurs à 5^{cm}, écart dont la précision des expériences ne permet pas de répondre; mais elles sont en retard sur les ondes qui passeraient si les plaques étaient supprimées et les extrémités des fils réunies. Le retard subsistant quand les plaques sont au

contact, ce qui supprime toute discontinuité dans le conducteur, on ne doit pas le considérer comme accompagnant nécessairement le phénomène physique de la transmission des ondes d'un fil à un autre, mais seulement comme résultant de la forme géométrique des surfaces métalliques. Les ondes ne peuvent traverser les plaques et sont obligées de les contourner pour rejoindre le fil secondaire. Ce retard n'existait pas dans les expériences que j'ai faites avec des bouteilles de Leyde ou des tubes, parce que les dimensions transversales de ces appareils étaient trop faibles pour que le détour qu'ils imposaient aux ondes fût appréciable.

Il est facile, au moyen de considérations identiques à celles que j'ai développées, de se rendre compte de la forme qu'affectent les lignes de force électrique et de s'apercevoir que la force électrique est nulle le long du bord de la plaque secondaire. Près de ce bord les lignes d'énergie se séparent en deux faisceaux, dont l'un rejoint le fil secondaire et dont l'autre pénètre dans l'espace compris entre les plaques; dans cette région, les lignes de force vont normalement d'une plaque à l'autre et les ondes y ont une forme cylindrique. Ces ondes se rétrécissent jusqu'à leur axe à partir duquel elles reviennent en arrière pour rejoindre ensuite le fil primaire.

2° *Transmission des ondes d'un fil à un fil parallèle.*

— On peut transmettre des ondes intenses d'un fil à l'autre sans l'intermédiaire d'aucune plaque métallique ou bouteille de Leyde; mais, au lieu de placer les extrémités des fils primaire et secondaire en regard, on dispose la partie du fil secondaire voisine de l'extrémité parallèlement et près de la partie extrême du fil secondaire, de sorte que les deux fils sont voisins et parallèles sur une certaine longueur; les ondes sont transmises au fil secondaire sans changement de phase, c'est-à-dire que la phase de l'onde secondaire est la même que celle de l'onde qui

parcourrait le même fil si celui-ci touchait le fil primaire sur toute la longueur où il lui est parallèle.

Si la longueur où les fils sont parallèles est très petite et si, finalement, on arrive au cas où les extrémités des fils sont simplement en regard, les ondes secondaires sont très faibles. Cependant, en prenant des fils de plusieurs millimètres de diamètre et en plaçant leurs extrémités en regard l'une de l'autre contre les deux faces d'une plaque de verre mince qui empêche des étincelles de jaillir d'un fil à l'autre, il m'a été possible de constater que l'onde était transmise sans changement de phase; seulement, à cause de la faible intensité des ondes secondaires, cette expérience ne comportait pas une grande précision.

IV. — ONDES RÉFLÉCHIES LE LONG DU FIL PRIMAIRE.

Lorsque les extrémités de deux fils parallèles, le long desquels se propagent des ondes, sont isolées et éloignées de tout conducteur secondaire et que l'on déplace entre les fils un résonateur rectangulaire dont deux côtés opposés sont parallèles à ces fils, les ondes directes et les ondes réfléchies à l'extrémité agissent simultanément sur le résonateur, et l'étincelle à la coupure passe par une série de maxima et de minima. Les minima sont distants d'une demi-longueur d'onde du résonateur. Le minimum le plus rapproché de l'extrémité de la ligne en est à une distance un peu inférieure à la demi-longueur d'onde.

Si la présence de fils secondaires tendus dans le prolongement des deux fils primaires provoque un changement de phase de l'onde réfléchie, la position des minima doit être modifiée. J'ai transmis, en partie, les ondes de l'extrémité de la ligne primaire à l'extrémité de la ligne secondaire par l'intermédiaire de deux petites bouteilles de Leyde. J'ai cherché, le long des fils primaires, la position du premier minimum de l'étincelle à la coupure d'un

résonateur de M. Blondlot dont la demi-longueur d'onde était $5^m, 10$. J'ai trouvé que ce minimum était toujours à $4^m, 70$ de l'extrémité des fils, soit que les extrémités de ces fils fussent éloignées de tout conducteur secondaire, soit qu'une partie de l'onde fût transmise à une ligne secondaire par l'intermédiaire des bouteilles de Leyde. La partie des ondes primaires qui n'est pas transmise aux fils secondaires est donc réfléchie dans les mêmes conditions que si ceux-ci n'existaient pas.

V. — FORME ET AMORTISSEMENT DES OSCILLATIONS SECONDAIRES.

Chacune des étincelles qui jaillit entre les boules d'un excitateur produit, le long de la ligne primaire, un train d'ondes amorties. Ayant montré que ces ondes peuvent passer en partie, sans changement de phase, à l'extrémité d'un fil secondaire, j'ai cherché si la forme des oscillations et leur amortissement étaient modifiés par le passage des ondes d'un fil à l'autre.

L'amplitude de l'oscillation en un point d'un fil, parcouru par un train d'ondes progressives, peut être représentée par une fonction du temps de la forme

$$F(t) = A e^{-\gamma \frac{t}{T}} \sin 2\pi \frac{t}{T},$$

où T désigne la période de l'oscillation et γ le décrement logarithmique.

Ce fait résulte des expériences de MM. Bjerknæs, Perot, Jones, Rubens ⁽¹⁾. Ces physiciens l'ont déduit de l'étude

(1) V. BJERKNÆS, *Ueber den zeitlichen Verlauf der Schwingungen in primären Hertz'schen Leiter* (Wied. Ann., t. XLIV, p. 513; 1890).

A. PEROT, *Sur les oscillations de Hertz* (Comptes rendus, t. CMIV, p. 165, I; 1892).

D.-E. JONES, *Ueber die Messung stehender Hertz'scher Schwingungen*. Beiblatter, 1893 (Brit. Assoc. Cardiff, p. 561; 1891).

H. RUBENS, *Stehende electrische Wellen in Drähten und deren Messung* (Wied. Ann., t. XLII, p. 154; 1891).

des interférences entre les ondes directes et les ondes qui reviennent après avoir atteint soit les extrémités de deux fils de transmission parallèles, soit un point réunissant les extrémités de ces fils.

Par la méthode électrométrique de M. Bjerknes, j'ai successivement déterminé la forme des oscillations qui se propagent le long d'une ligne de deux fils parallèles, d'abord lorsque les deux fils sont continus depuis l'excitateur, et ensuite lorsque les ondes ont, durant leur trajet, passé d'un conducteur à un autre.

L'électromètre est construit de la manière suivante : deux plaques carrées en laiton, de 5^{cm}, 5 de côté, ont leurs plans parallèles et verticaux et communiquent respectivement avec deux points en regard de chacun des fils le long desquels se propagent les ondes.

Entre ces plaques est suspendue, par un fil de quartz de 3^{cm}, 05 de long, une feuille d'aluminium rectangulaire de 4^{cm} de haut et de 3^{cm}, 5 de large. Son plan est vertical et, dans la position d'équilibre du fil de torsion, fait un angle de 45° avec les plans des plaques. A cette feuille d'aluminium est fixé un miroir qui permet d'en observer les déviations. M. Bjerknes (1) a fait, dans quelques expériences, usage d'un électromètre analogue à celui-ci ; M. Ebert (2) a vérifié que les déviations de l'aiguille sont dans de très larges limites proportionnelles à des différences de potentiel statiques établies entre les deux plaques. L'aiguille isolée s'électrise par influence lors du passage des ondes et est déviée par les deux plaques. On peut faire varier la sensibilité de l'électromètre en rapprochant plus ou moins les plaques de l'aiguille.

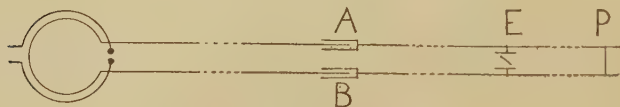
Au delà de l'électromètre et à une distance variable de

(1) V. BJERKNES, *Wied. Ann.*, t. XLVIII, p. 594 ; 1893.

(2) H. EBERT et W. HOFFMANN, *Zeitschrift für Instrumentenkunde. Ueber ein Voltmeter für effective Wechselstromspannungen*, janvier 1898.

ce dernier, les deux fils, le long desquels se propagent les ondes, sont réunis par un pont. Des ondes reviennent en arrière après avoir atteint le milieu de ce pont et interfèrent avec les ondes directes.

Fig. 13.



Soit $F(t)$ la différence de potentiel au temps t entre les plaques, due aux ondes directes; $F(t)$ est la fonction du temps que représente la forme du train d'ondes émis par l'excitateur. La différence de potentiel due à l'onde qui a traversé le pont sera $\varepsilon F(t-h)$, h étant le temps que les ondes mettent à revenir à l'électromètre, et ε un facteur plus petit que l'unité que l'on doit introduire pour tenir compte de ce qu'une petite fraction des ondes est réfléchiée par l'électromètre, à cause de la variation brusque de capacité de la ligne qu'il occasionne ⁽¹⁾. La différence de potentiel résultant de l'interférence des ondes directes et des ondes réfléchies sera

$$F(t) - \varepsilon F(t-h).$$

On doit prendre le signe —, car le sens de la force électrique est renversé lorsque les ondes reviennent après avoir atteint le pont.

Le couple mécanique exercé sur l'aiguille de l'électromètre, pendant le temps dt , sera proportionnel à

$$[F(t) - \varepsilon F(t-h)]^2 dt,$$

et l'action totale due au double passage d'un train d'ondes

⁽¹⁾ J. VON GEITLER, *Reflexion electrischer Drahtwellen* (*Wied. Ann.*, t. XLIX, p. 184; 1893).

qui atteint l'électromètre au temps 0,

$$D = \int_0^{\infty} [F(t) - \varepsilon F(t-h)]^2 dt.$$

En remarquant que $F(t-h)$ est nul tant que t est inférieur à h , puisque l'onde ne revient à l'électromètre qu'au temps $t=h$,

$$D = \int_0^{\infty} F^2(t) dt + \varepsilon^2 \int_h^{\infty} F^2(t-h) dt - 2\varepsilon \int_h^{\infty} F(t)F(t-h) dt.$$

Puisque, d'après les expériences que j'ai citées $F(t)$, est de la forme

$$F(t) = A e^{-\gamma \frac{t}{T}} \sin 2\pi \frac{T}{t},$$

on trouve facilement la valeur des intégrales et D se met sous la forme

$$D = B_1 - B e^{-\frac{\gamma}{T}h} \cos\left(2\pi \frac{h}{T} - \beta\right),$$

en posant

$$\tan \beta = \frac{\gamma}{2\pi},$$

h est le temps que l'onde met à revenir à l'électromètre; ce temps est égal à celui que l'onde met à parcourir deux fois la distance de l'électromètre au milieu du pont, plus un retard dû à la capacité de l'électromètre. Si j'appelle x la distance de l'électromètre au milieu du pont, V la vitesse de propagation des ondes et que je représente par $\frac{2x_0}{V}$ le retard dû à l'électromètre,

$$h = \frac{2(x+x_0)}{V}$$

et

$$D = B_1 - B e^{-2\gamma \frac{x+x_0}{\lambda}} \cos\left(4\pi \frac{x+x_0}{\lambda} - \beta\right),$$

où $\lambda = VT$ représente la longueur des ondes émises par

l'excitateur. Cette équation donne, pour les différentes positions du pont, la valeur des déviations de l'aiguille de l'électromètre. La courbe représentée par cette équation est une sinusoïde amortie, dont la longueur d'onde est la moitié de la longueur d'onde de l'excitateur et dont le décroissement logarithmique est le même que celui des oscillations électriques. L'électromètre permet de construire cette courbe par l'expérience, par suite de vérifier que les oscillations sont bien pendulaires et de trouver la valeur de la période et de l'amortissement.

Les ondes se propageaient le long de deux fils de cuivre de 1^{mm} de diamètre, parallèles et distants de 10^{cm}. La longueur de la ligne entre l'excitateur et l'électromètre était d'environ 10^m. La plus grande partie des fils étaient tendus dans une cour, ils étaient soutenus par des poteaux munis d'isolateurs en faïence. L'isolement était suffisant pour que, par un temps pluvieux, l'onde ne fût pas sensiblement plus affaiblie par son passage dans les fils que par un temps sec. La ligne se continuait dans l'intérieur du laboratoire à 16^m, 70 au delà de l'électromètre. Les ondes étaient produites par un excitateur de M. Blondlot ayant 1^m de diamètre; il était chargé par une machine de Holtz; les étincelles sont plus régulières que celles qui seraient fournies par une bobine et j'ai constaté que, quand on faisait fonctionner l'excitateur, l'aiguille de l'électromètre était déviée et, après quelques oscillations, restait bien immobile. Il peut arriver que, par suite d'un léger balancement, l'aiguille s'approche trop près d'un des plateaux de l'électromètre et soit chargée par une étincelle ou des aigrettes; pour cette raison, il faut avoir soin, après chaque lecture d'une déviation de l'aiguille, de vérifier qu'elle revient bien au zéro, ce qui n'aurait pas lieu si elle était électrisée.

J'ai d'abord cherché la forme des oscillations émises par l'excitateur et qui se propagent jusqu'à l'électromètre

le long de fils continus. Dans ce but, j'ai observé les déviations de l'électromètre pour différentes positions du pont P (*fig.* 13). Le Tableau suivant donne les distances comptées le long des fils depuis l'électromètre jusqu'au milieu du pont et les déviations correspondantes de l'électromètre.

Distances en mètres de l'électromètre au milieu du pont.	Déviations de l'électro- mètre.	Déviations calculées.
0,00	0,0	— 2,9
1,00	5,0	8,4
2,00	16,0	19,2
3,00	27,0	26,8
4,00	30,0	30,0
5,00	28,5	29,0
6,00	27,0	26,2
7,00	23,0	21,9
8,00	19,5	18,9
9,00	17,5	16,9
10,00	16,5	16,4
11,00	17,0	17,1
12,00	18,5	18,3
13,00	20,0	19,5
14,00	20,5	20,4
15,00	20,5	20,8
16,00	19,5	20,8
16,70	19,5	20,3

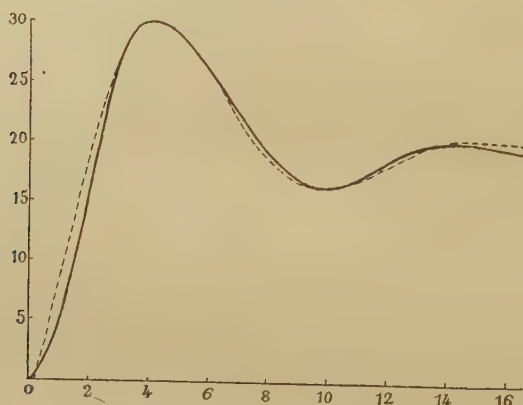
Pour m'assurer que les nombres d'une série d'expérience sont comparables, ce qui ne peut être que si la fréquence des étincelles de l'excitateur reste constante, j'ai recommencé à déterminer les déviations de l'électromètre pour quelques positions du pont et j'ai rejeté toute série d'expériences pour laquelle je ne retrouvais pas les mêmes nombres. La courbe représentée par la *fig.* 14 a été obtenue en portant en abscisses les distances de l'électromètre au milieu du pont et en ordonnées les déviations de l'électromètre. J'ai cherché à représenter cette courbe

par une équation de la forme

$$D = B_1 - B e^{-2\gamma \frac{x+x_0}{\lambda}} \cos \left(4\pi \frac{x+x_0}{\lambda} - \beta \right),$$

où $\frac{\lambda}{4}$ est la différence des ordonnées d'un maximum et du minimum suivant; $e^{-\frac{\gamma}{2}}$ le rapport de la différence des

Fig. 14.



ordonnées du second maximum et du premier minimum, à la différence des ordonnées du premier maximum et du même minimum; si la position d'un maximum ou d'un minimum est imparfaitement déterminée par la courbe, le rapport d'amortissement $e^{-\frac{\gamma}{2}}$ est néanmoins déterminé exactement; x_0 , retard dû à l'électromètre, sera la différence entre l'abscisse du premier maximum et la $\frac{1}{2}$ longueur d'onde de la courbe.

En adoptant les valeurs :

$\lambda = 22^m, 40$ longueur d'onde de l'excitateur;

$e^{-\frac{\gamma}{2}} = 0,33$, d'où $\gamma = 2,2$ décrément logarithmique des oscillations;

$x_0 = 1^m, 30$, retard dû à l'électromètre;

$\beta = \frac{\pi}{10}$ et $\frac{B_1}{B} = 0,62$,

et, en portant ces valeurs dans la formule, j'ai calculé les déviations de l'électromètre dans l'hypothèse où les oscillations sont pendulaires. Les nombres obtenus sont inscrits dans la troisième colonne du Tableau précédent, et la courbe obtenue en se servant de ces nombres est figurée en pointillé. En dehors des points voisins de l'origine, où la différence entre les ordonnées peut être attribuée aux perturbations que l'électromètre apporte dans la propagation des ondes, la courbe expérimentale et la courbe calculée présentent un accord satisfaisant. Il en résulte que les oscillations qui se propagent le long des fils sont pendulaires, ont une longueur d'onde de $22^m,40$ et un décrement logarithmique égal à 2,20.

Dans ce qui précède, j'ai seulement tenu compte des interférences entre les ondes venant de l'excitateur et les ondes correspondantes qui ont traversé le pont.

Il ne peut, en effet, se produire, à l'électromètre, d'interférences entre ces ondes et celles qui reviennent après une réflexion à l'excitateur. A cause de la grande valeur du décrement logarithmique, les oscillations sont complètement amorties après trois oscillations doubles, c'est-à-dire que l'étincelle de l'excitateur ne jaillit pas plus de trois fois dans chaque sens; il en résulte qu'un train d'ondes est tout entier contenu dans une longueur de fil inférieure à deux fois la longueur de la ligne. Les ondes, qui, après une réflexion à l'excitateur, reviennent à l'électromètre, ne l'atteignent qu'après que toutes les parties du fil situées au delà ont été abandonnées par le train d'ondes et il ne se produira d'interférences qu'entre des ondes venant de l'excitateur et les ondes correspondantes qui ont traversé le pont.

Ayant obtenu la forme des ondes émises par l'excitateur le long des fils continus, pour chercher comment le passage des ondes d'un fil à l'autre modifie leur forme, j'ai

coupé les deux fils de la ligne en MN (*fig. 13*) à 50^m environ de l'excitateur, puis j'ai réuni les deux extrémités des fils du côté de l'excitateur à chacune des armatures de deux bouteilles de Leyde identiques, et du côté de l'électromètre à chacune des armatures externes. L'électromètre ne reçoit alors que des ondes qui ont été transmises d'un conducteur à un autre par les bouteilles de Leyde. J'ai répété la même série d'expériences que sur les ondes qui avaient parcouru des fils continus. L'amortissement des oscillations produites par un excitateur dépend de la résistance et, par suite, de la longueur de l'étincelle; j'ai donc eu soin, pour pouvoir comparer les résultats des deux séries d'expériences, de conserver la même longueur à cette étincelle. Les déviations de l'électromètre sont données par le Tableau suivant :

Distances en mètres de l'électromètre au milieu du pont.	Déviations de l'électro- mètre.	Déviations calculées.
0,00.....	0,0	2,7
1,00.....	5,5	10,9
2,00.....	15,5	17,2
3,00.....	20,0	20,0
4,00.....	19,0	19,8
5,00.....	17,0	17,5
6,00.....	14,0	14,5
7,00.....	12,0	12,1
8,00.....	11,0	10,9
9,00.....	10,0	10,0
10,00.....	10,5	10,5
11,00.....	11,5	11,4
12,00.....	13,0	12,2
13,00.....	13,0	12,9
14,00.....	12,5	13,2
15,00.....	12,5	13,2
16,00.....	12,5	13,1
16,70.....	12,0	13,0

J'ai calculé les déviations au moyen de la formule

$$D = B_1 - B e^{-\frac{2\gamma(x+x_0)}{\lambda}} \cos\left(4\pi \frac{x+x_0}{\lambda} - \beta\right),$$

en attribuant aux constantes les valeurs suivantes, déduites de la courbe expérimentale (*fig. 15*) :

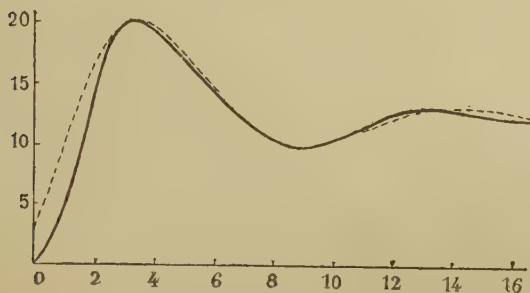
$\lambda = 22^m, 40$, longueur d'onde de l'excitateur ;

$e^{-\frac{\gamma}{2}} = 0,32$, d'où $\gamma = 2,27$, décrement logarithmique ;

$x_0 = 2^m, 20$, retard dû à l'électromètre ;

$\beta = \frac{\pi}{10}$ et $\frac{B_1}{B} = 0,62$.

Fig. 15.



Les valeurs des déviations calculées sont inscrites dans la troisième colonne du Tableau précédent et la courbe correspondante est tracée en pointillé. Cette courbe ne s'écarte de la courbe expérimentale que dans la région voisine de l'origine, où les écarts sont dus aux perturbations causées par la présence de l'électromètre. Les oscillations transmises aux fils secondaires par les bouteilles de Leyde sont donc pendulaires et ont $22^m, 40$ de longueur d'onde et 2,27 comme décrement logarithmique. La longueur d'onde est la même que celle des ondes primaires, l'écart entre les décrets logarithmiques n'atteignant que 0,07 est inférieur aux erreurs d'expérience.

La comparaison des résultats des deux séries d'expériences permet donc de conclure que :

Si les oscillations le long des fils primaires sont pendulaires et amorties, les oscillations transmises aux fils secondaires sont également pendulaires et ont la même période et le même amortissement que les oscillations primaires.

L'amortissement des oscillations secondaires est, comme dans les expériences sur les ondes primaires, assez grand pour qu'un train d'ondes tienne tout entier dans 100^m de fil. Il en résulte que les ondes directes ne peuvent interférer à l'électromètre qu'avec les ondes correspondantes qui ont traversé le pont et non avec des ondes qui auraient été réfléchies une fois sur les bouteilles de Leyde qui sont à 50^m de l'électromètre ou, sur l'excitateur, qui en est à 100^m.

Remarque. — Si l'on compare les deux courbes des *fig.* 14 et 15, on constate que le premier maximum ne correspond pas à la même position du pont. Cette différence peut être attribuée à ce que, dans les deux cas, l'électromètre et les fils de jonction de cet électromètre aux fils de transmission des ondes produisent des retards différents à cause de la différence d'intensité des ondes. Pour vérifier ce fait, j'ai produit, avec le même excitateur, des ondes d'intensité différente en faisant varier la longueur de l'étincelle excitatrice. J'ai étudié, au moyen de l'électromètre, la forme des ondes émises dans des fils continus lorsque l'étincelle avait 0^{cm},4 et ensuite 0^{cm},8 de longueur; j'ai trouvé, en effet, que la position du pont qui correspondait au premier maximum était à 4^m de l'électromètre dans le premier cas et à 4^m,50 dans le second cas où les ondes étaient plus intenses.

En comparant les décroissements logarithmiques des oscillations dans ces deux dernières expériences, on observe que, pour les oscillations correspondant à une étincelle

de 0^{cm},4, il est 2,54, tandis que pour une étincelle de 0^{cm},8, il est seulement 2,04. Cela tient, sans doute, à ce que l'étincelle la plus longue est aussi la plus chaude et, par suite, la moins résistante.

VI. — INTENSITÉ DES OSCILLATIONS SECONDAIRES.

Les ondes électriques sont transmises sans changement de phase de l'extrémité d'un fil primaire à l'extrémité d'un fil secondaire, et ni la période, ni l'amortissement des ondes ne sont modifiés par leur passage d'un conducteur à l'autre. Il reste à étudier le rapport des intensités des ondes primaires et secondaires.

Si l'on relie les deux plaques de l'électromètre déjà décrit, respectivement aux extrémités de deux fils parallèles le long desquels se propagent des ondes, la différence de potentiel entre les plaques de l'électromètre, due à l'arrivée d'un train d'ondes, sera, comme le démontrent les expériences du Chapitre précédent, une fonction du temps de la forme

$$F(t) = A e^{-\gamma \frac{t}{T}} \sin 2\pi \frac{t}{T},$$

en appelant $t = 0$ l'époque où les ondes atteignent l'électromètre.

La déviation de l'électromètre mesure la quantité

$$D = \int_0^\infty \left(A e^{-\gamma \frac{t}{T}} \sin 2\pi \frac{t}{T} \right)^2 dt.$$

En effectuant l'intégration on trouve

$$D = \frac{A^2}{4 \frac{\gamma}{T}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\gamma^2}{T^2}}.$$

Après avoir mesuré la déviation de l'électromètre lorsque les fils se continuent sans interruption depuis l'excitateur

jusqu'à l'électromètre, je coupe les fils au milieu de leur trajet et je transmets les ondes au delà de cette discontinuité par l'un des procédés que j'ai décrits. Les ondes arrivent alors à l'électromètre après avoir passé d'un système de conducteurs à un autre; elles ont parcouru la même longueur de fils et, comme on l'a vu, ont la même période et le même amortissement que lorsque les fils étaient continus. Je mesure de nouveau la déviation de l'électromètre; le rapport des deux déviations me donne le rapport des carrés des coefficients A correspondant aux ondes qui ont suivi un fil continu et aux ondes secondaires; ce rapport est précisément la fraction d'énergie du train d'ondes primaires qui a été transmise aux fils secondaires.

Les ondes étaient produites par des excitateurs de M. Blondlot, actionnés par une machine de Holtz, dont la vitesse était maintenue constante. La ligne avait 100^m de long, elle était formée de deux fils de cuivre de 1^{mm}, parallèles et distants de 0^m,10. Les deux fils ne sont pas, comme dans les expériences sur l'amortissement, réunis par un pont établissant, près de l'électromètre, une communication métallique entre les deux plaques de ce dernier; il faut, par suite, éviter que l'excitateur ne produise dans les fils des charges statiques, qui pourraient établir une différence de potentiel entre les plaques de l'électromètre; c'est pourquoi j'ai réuni à la terre le milieu A (*fig.* 16) du cercle secondaire de l'excitateur, ce qui, comme je l'ai constaté, n'affaiblit pas les ondes qu'il émet. L'excitateur de M. Blondlot est préférable dans les expériences électrométriques à l'excitateur à plaques de Hertz, parce que les deux fils de la ligne sont réunis entre eux par l'intermédiaire de l'excitateur et peuvent de plus être reliés au sol; cet avantage est ici considérable, car les moindres charges statiques agissent constamment sur l'électromètre et peuvent produire sur l'aiguille des ac-

tions aussi grandes que des ondes intenses qui n'agissent que pendant une fraction extrêmement faible du temps.

Je n'ai tenu aucun compte des ondes qui, après une réflexion à l'électromètre et une réflexion, soit à l'excitateur, soit au point où la ligne est coupée, pouvaient revenir une seconde fois à l'électromètre, mais l'influence de ces ondes pouvait être négligée; j'ai, en effet, constaté à plusieurs reprises que si, au lieu de laisser les deux plaques de l'électromètre isolées l'une de l'autre, on les réunit par un pont formé de plombagine, qui absorbe complètement, ou au moins modifie considérablement l'intensité de l'onde réfléchie ⁽¹⁾, le rapport des déviations de l'électromètre, lorsque les ondes primaires puis les ondes secondaires agissent sur lui, reste le même.

Enfin, pour être certain que le fonctionnement de l'excitateur n'avait pas varié d'une expérience à l'autre, j'ai toujours observé deux fois la déviation de l'électromètre lorsque les fils étaient continus : une fois avant d'observer la déviation due à l'onde secondaire et une fois après, et j'ai rejeté les expériences pendant lesquelles cette déviation avait changé.

J'ai déterminé comment variait la fraction de l'énergie des ondes primaires, transmise aux fils secondaires, quand on changeait :

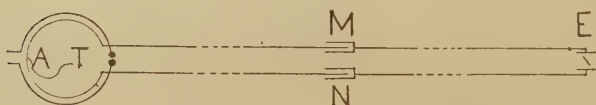
- 1° L'intensité des ondes primaires;
- 2° Leur longueur d'onde;
- 3° Les dimensions et la forme des appareils qui servaient à faire passer les ondes de la ligne primaire à la ligne secondaire.

1° *Influence de l'intensité des ondes primaires.* — Les ondes étaient transmises des fils primaires aux fils secondaires par deux petites bouteilles de Leyde identiques,

(1) BARTON et BRYAN, *Absorption of electric waves along wires by a terminal bridge* (*Phil. Mag.*, t. XLIII p. 39; 1897).

formées chacune d'un bout de tube de verre de $1^{\text{cm}},36$ de diamètre extérieur et $0^{\text{cm}},16$ d'épaisseur à l'extérieur et à l'intérieur duquel étaient collés des anneaux de papier d'étain de $0^{\text{cm}},9$ de largeur. Chacune des armatures internes était reliée à l'extrémité de l'un des fils de la ligne primaire et chacune des armatures externes à l'extrémité du fil correspondant de la ligne secondaire.

Fig. 16.



J'obtiens des ondes de différentes intensités en modifiant la longueur de l'étincelle de l'excitateur. Le tableau suivant donne les déviations de l'électromètre dans le cas où, les bouteilles de Leyde étant enlevées, les extrémités des fils primaires et secondaires sont réunies et dans le cas où l'électromètre reçoit les ondes secondaires transmises par les bouteilles de Leyde. J'ai inscrit en regard le rapport des déviations de l'électromètre pour deux longueurs différentes de l'étincelle de l'excitateur.

Longueurs de l'étincelle de l'excitateur.	Déviations de l'électromètre.		Fraction de l'énergie transmise.
	Ondes		
	primaires.	secondaires.	
0 ^{cm} ,75.....	29	12	0,41
0 ^{cm} ,35.....	21	9	0,43

Dans les deux séries d'expériences, les intensités des ondes primaires sont bien plus différentes que ne le fait supposer le rapport des déviations de l'électromètre car le débit de la machine de Holtz restant constant, les étincelles sont d'autant plus fréquentes qu'elles sont plus courtes. Malgré cela le rapport des déviations correspondant aux

ondes primaires et aux ondes secondaires n'a pas sensiblement varié, on peut donc conclure que *la fraction d'énergie transmise des fils primaires aux fils secondaires est indépendante de l'intensité des ondes primaires.*

La forme des six équations de Hertz permet d'ailleurs de prévoir ce résultat. Si XYZ, composantes de la force électrique en un point du champ pris dans le diélectrique, et LMN, composantes de la force magnétique, sont des intégrales des deux groupes d'équations

$$A \frac{dL}{dt} = \frac{dZ}{dy} - \frac{dY}{dz},$$

et

$$A \frac{dX}{dt} = \frac{dM}{dz} - \frac{dN}{dy},$$

aX , aY , aZ , aL , aM , aN , a étant une constante, sont aussi des intégrales. Si donc dans deux expériences consécutives le rapport des intensités de la force électrique ou magnétique en un point voisin du fil primaire à une valeur a , en tout point du champ et, en particulier, le long du fil secondaire, leurs intensités seront dans le même rapport.

2° *Influence de la longueur d'onde.* — En employant successivement des excitateurs produisant des ondes de 22^{mm},40 et 10^{mm},80 de longueur et en me servant pour transmettre les ondes des bouteilles de Leyde décrites dans le paragraphe précédent, j'ai trouvé qu'elles transmettaient $\frac{84}{100}$ de l'énergie des ondes de 10^m,80 et seulement $\frac{32}{100}$ de l'énergie des ondes de 22^m,40.

Si, au lieu de bouteilles de Leyde, on emploie deux plateaux métalliques circulaires de 11^{cm} de diamètre, dont les plans sont parallèles et distants de 0^{cm},8, reliés l'un à un fil primaire, l'autre au fil secondaire correspondant, ils laissent passer $\frac{76}{100}$ de l'énergie des ondes de 10^m,80 et seulement $\frac{37}{100}$ de l'énergie des ondes de 22^m,40.

La fraction d'énergie transmise aux fils secondaires est donc d'autant plus grande que la longueur d'onde est plus courte.

3° *Influence de la forme géométrique et des dimensions des conducteurs qui servent à transmettre les ondes des fils primaires aux fils secondaires.*

Pour transmettre les ondes d'un fil à un autre, j'ai, dans tout ce qui précède, relié l'extrémité du fil primaire à un conducteur dont la surface est voisine et en regard de la surface d'un second conducteur attaché au fil secondaire. Ces deux conducteurs (armatures d'une bouteille de Leyde, plaques métalliques parallèles) sont disposés l'un par rapport à l'autre comme les deux armatures d'un condensateur. Je vais d'abord montrer que l'intensité des ondes transmises n'est pas déterminée uniquement par la capacité de ce condensateur, mais encore par la forme des armatures, et même, par leur orientation par rapport à la direction de propagation des ondes.

A cet effet, je transmets les ondes au moyen de condensateurs cylindriques dont l'armature externe est un tube de 7^{cm} de diamètre et 55^{cm} de long, fermé à l'une de ses extrémités, et l'armature interne une tige concentrique de 2^{cm} de diamètre, qui pénètre jusqu'à 5^{cm} du fond du tube.

Deux condensateurs identiques sont disposés dans le prolongement des fils de la ligne primaire; ceux-ci communiquent avec les armatures internes, tandis que les extrémités des fils secondaires sont soudées à l'extrémité fermée des tubes extérieurs, les ondes secondaires font dévier l'aiguille de l'électromètre de trente-quatre divisions.

J'ai ensuite retourné bout pour bout les condensateurs, de façon à faire communiquer les fils primaires avec les armatures externes et les fils secondaires avec les armatures internes; les ondes secondaires ne dévient plus alors l'aiguille de l'électromètre que de vingt-huit divisions.

J'ai répété ces expériences plusieurs fois de suite en les croisant, pour m'assurer que l'intensité des ondes produites par l'excitateur n'avait pas varié d'une expérience à l'autre. Un même condensateur cylindrique ne transmet donc pas la même fraction des ondes primaires, suivant que c'est l'armature interne ou l'armature externe qui reçoit ces ondes. Ce résultat ne doit pas surprendre si l'on remarque que les *fig.* 9 et 10, qui donnent justement les tracés des lignes de force dans les deux cas, ne sont pas identiques.

Il s'ensuit que *deux condensateurs de même capacité électrostatique ne transmettent pas nécessairement au fil secondaire des ondes ayant la même intensité.*

Ces appareils ne remplissent pas ici le rôle de condensateurs électrostatiques accumulant sur chacune des armatures des charges égales et de signe contraire; toutefois, comme l'action des conducteurs primaire et secondaire l'un sur l'autre est d'autant plus grande que leurs surfaces en regard sont plus grandes et qu'ils sont plus rapprochés, l'intensité de l'onde transmise augmente, en général, en même temps que la capacité du condensateur formé par les deux conducteurs. J'ai mesuré l'intensité de l'onde secondaire transmise par des bouteilles de Leyde de capacité croissante; elles sont formées de tubes de verre de 1^{cm},45 de diamètre extérieur et de 0^{cm},06 d'épaisseur. Les anneaux de papier d'étain qui constituent les armatures ont 3^{cm},7, 1^{cm},8, 0^{cm},9, 0^{cm},6 de largeur.

Le Tableau suivant donne la fraction de l'énergie transmise pour des ondes de 22^m,40 et 10^m,80 de longueur.

Largeur des armatures. cm	Énergie transmise.	
	$\lambda = 22^m, 40.$	$\lambda = 10^m, 80.$
3,7.....	1	1
1,8.....	0,90	1
0,9.....	0,79	1
0,6.....	0,65	0,96

On voit que, malgré les très petites dimensions des bouteilles de Leyde, la première transmet toute l'énergie des ondes de $22^m, 40$ et les trois premières toute l'énergie des ondes de $10^m, 80$. Comme j'ai montré dans les Chapitres précédents que ni l'amortissement, ni la phase des ondes n'étaient modifiés lors du passage de la ligne primaire à la ligne secondaire, *les ondes se propagent au delà de ces bouteilles de Leyde exactement comme si le conducteur était continu.*

M. Drude (1) a constaté un phénomène du même genre dans ses expériences de mesure du pouvoir inducteur, au moyen d'ondes électriques très courtes. Il réunissait les extrémités de deux fils de transmission, tantôt par un pont métallique continu, tantôt en faisant communiquer les extrémités des deux fils avec les deux armatures d'un condensateur de très petite capacité et il a trouvé que, si cette capacité n'est pas extrêmement petite le condensateur agit exactement comme le pont métallique.

Si l'on transmet les ondes au moyen de plaques circulaires, parallèles et en regard reliées, par leurs centres, l'une au fil primaire l'autre au fil secondaire il est impossible d'arriver à transmettre intégralement les ondes; il y a toujours une partie de l'énergie qui est réfléchie, même si la capacité du condensateur formé par les deux plaques est supérieure à celle d'une petite bouteille de Leyde qui transmet complètement les ondes.

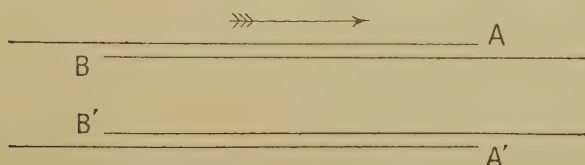
(1) P. DRUDE, *Wied. Ann.*, t. LXI, p. 466. — *Ecl. élect.*, t. XIV, p. 82; 1898.

Deux plaques de 18^{cm} de diamètre placées à $0^{\text{cm}},8$ l'une de l'autre transmettent $\frac{90}{100}$ de l'énergie amenée par des ondes primaires de $10^{\text{m}},80$ de longueur d'onde, et deux plaques de 35^{cm} à la même distance n'en transmettent pas plus. Ceci peut s'expliquer par le fait que la première plaque que rencontrent les ondes forme une sorte d'écran sur lequel elles se réfléchissent en partie.

Les dimensions des plaques ou des bouteilles de Leyde dont je me suis servi étaient de très petites fractions de la longueur d'onde ; j'ai étudié l'intensité des ondes secondaires lorsque les fils primaire et secondaire sont voisins et parallèles sur une longueur supérieure au quart de la longueur d'onde.

J'ai déjà signalé que le passage des ondes d'un fil à l'autre s'effectue sans changement de phase, si l'on place parallèlement et à une petite distance l'une de l'autre les parties voisines des extrémités des fils primaire et secondaire correspondants (*fig. 17*). Pour chercher comment

Fig. 17.



varie l'intensité de l'onde secondaire quand on augmente les longueurs AB , $A'B'$ où les deux fils sont parallèles, je mesure les déviations de l'électromètre lorsque les points correspondants des fils parallèles sont réunis en A et B ou en A' et B' de façon que les ondes parcourent des conducteurs continus, puis lorsque ces fils sont séparés, leur distance étant d'environ $0^{\text{cm}},5$. La longueur d'onde était $10^{\text{m}},80$.

Le Tableau suivant donne les déviations de l'électro-

mètre pour différentes longueurs AB des parties parallèles ainsi que la fraction d'énergie qui est transmise aux fils secondaires.

Longueur des fils parallèles.	Déviation de l'électromètre.		Fraction d'énergie transmise.
	Ondes primaires.	Ondes secondaires.	
$0,50 \dots$	24,5	11	0,45
$1,06 \dots$	24,5	15,5	0,63
$1,50 \dots$	25,5	18	0,70
$2,12 \dots$	24,5	19	0,77
$\left(\frac{\lambda}{4}\right) 2,70 \dots$	25,5	21,5	0,84
$3,20 \dots$	25	21	0,84
$3,90 \dots$	25	17	0,68
$4,25 \dots$	25,5	16	0,62

On voit que l'intensité des ondes secondaires n'augmente pas constamment quand on augmente la longueur le long de laquelle les fils primaire et secondaire sont voisins, leur intensité passe par un maximum quand cette longueur est égale au quart de la longueur d'onde. L'extrémité du fil secondaire se trouve alors en face de la partie du fil primaire où les ondes incidentes et les ondes réfléchies à l'extrémité du fil primaire ont une différence de marche égale à une demi-longueur d'onde, c'est-à-dire où la direction de la force électrique due à l'onde primaire est toujours inverse à celle due à l'onde réfléchie.

En résumé, il résulte des expériences rapportées dans ce Chapitre que l'intensité des ondes secondaires ne dépend pas uniquement de la capacité électrostatique de l'appareil qui sert à les transmettre depuis le fil primaire; qu'il est possible de transmettre intégralement les ondes primaires aux fils secondaires; que la fraction des ondes primaires qui passe le long de la ligne secondaire est indépendante de l'intensité des ondes primaires, mais est d'autant plus grande que la longueur d'onde est plus courte.

DEUXIÈME PARTIE.

PASSAGE DES ONDES ÉLECTRIQUES D'UN FIL PRIMAIRE A UN FIL SECONDAIRE QUI LUI EST PARALLÈLE DE PART ET D'AUTRE D'UN POINT OU LA FORCE ÉLECTRIQUE EST NULLE.

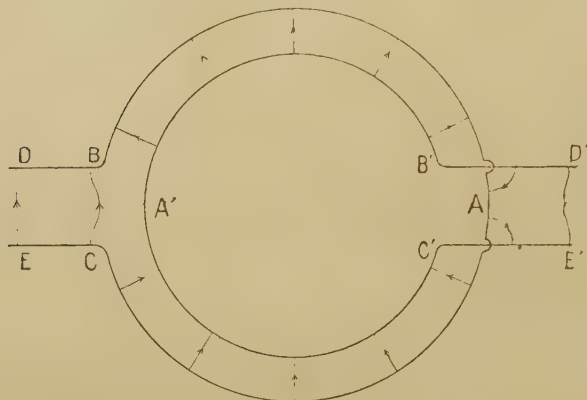
Les ondes électriques sont réfléchies à l'extrémité d'un fil sans changement de sens de la force électrique, de sorte que c'est à l'extrémité du fil que cette force atteint *la plus grande intensité*. Dans toutes les expériences qui précèdent, j'ai transmis les ondes au fil secondaire en l'approchant du fil primaire dans cette région où la force électrique est maximum.

Si l'on transmet les ondes le long de deux fils parallèles issus des deux pôles de l'excitateur, les lignes de force électrique forment des arcs qui aboutissent à deux points en regard de chacun des fils; lorsque les extrémités de ces fils sont réunies par un pont, les ondes, après avoir atteint ce pont, rebroussent chemin, et cette réflexion est accompagnée d'un changement de sens de la force électrique. Le long du pont lui-même les lignes de force ont à chaque instant leurs extrémités de signes contraires de part et d'autre et à égale distance du milieu de ce pont; la force électrique doit donc être *constamment nulle* en ce milieu. Je me suis proposé d'étudier comment s'effectue le passage des ondes à un fil secondaire parallèle au fil primaire, sur une certaine longueur, de part et d'autre de ce point de force électrique nulle.

Les extrémités B et C (*fig. 18*) des fils primaires, distantes de 10^{cm}, sont réunies par un pont BAC ayant la forme d'un cercle incomplet de 50^{cm} de diamètre. Dans le plan de ce cercle est disposé un fil B'A'C' formant un autre cercle concentrique au premier et de diamètre plus

petit d'environ 1^{cm}. Ce cercle, également incomplet, réunit les extrémités B' et C' d'une ligne de deux fils parallèles B'D' et C'E'. On constate que les ondes issues de

Fig. 18.



l'excitateur le long de la ligne primaire (DB, EC) passent en partie le long de la ligne secondaire (B'D', C'E') par l'intermédiaire des deux cercles.

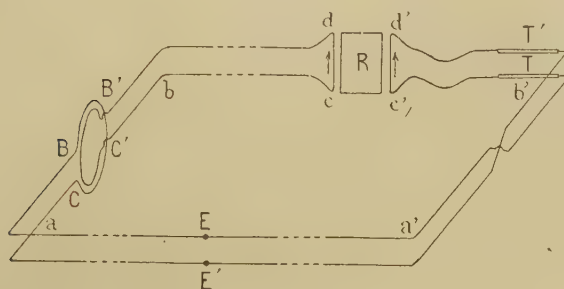
I. — PHASE DES OSCILLATIONS SECONDAIRES.

Pour rechercher si le passage des ondes de la ligne primaire à la ligne secondaire était accompagné d'un changement de phase, j'ai employé la méthode qui m'a servi à étudier la phase des ondes transmises par des bouteilles de Leyde à un fil secondaire.

Deux lignes formées chacune de deux fils parallèles partent des deux pôles E, E' (*fig. 19*) d'un même excitateur. A l'extrémité de ces lignes, je fais agir les ondes transmises par chacune d'elles sur un même résonateur disposé de telle sorte que si les ondes y arrivent en con-

cordance, elles produisent des effets inverses, ce qui fait disparaître l'étincelle à la coupure; si, au contraire, les deux ondes diffèrent d'une demi-période, leurs effets s'ajoutent et l'étincelle a une longueur maximum.

Fig. 19.



L'une des deux branches de l'appareil est formée d'une ligne continue. Un tube T de 3^{mm} de diamètre et une tige de cuivre qui glisse dans ce tube sont intercalés sur chacun des deux fils de la ligne et permettent, comme dans les expériences décrites dans la première Partie, de faire varier la longueur de cette ligne.

L'autre branche est formée par la succession des lignes primaire et secondaire. Les ondes passent de l'une à l'autre par l'intermédiaire des deux cercles concentriques. On peut rendre cette seconde branche de l'appareil continue comme la première; il suffit, après avoir enlevé les deux cercles, de joindre par des fils métalliques les extrémités correspondantes des fils primaires et secondaires; je réunis B à B' et C à C' par des fils courbés en arcs de cercles d'un diamètre égal à celui du plus grand des deux cercles concentriques.

La résonateur rectangulaire R est placé entre deux ponts cd et $c'd'$ disposés aux extrémités de chacune des lignes.

Les fils primaire et secondaire étant d'abord réunis, chacun des systèmes d'onde venant de l'excitateur se propage le long de fils continus; je détermine la longueur qu'il faut donner à la ligne $a'b'c'$ pour éteindre l'étincelle du résonateur, c'est-à-dire la longueur pour laquelle les deux systèmes d'ondes arrivent au résonateur en concordance. J'enlève ensuite les fils qui réunissent les lignes primaire et secondaire et je fais passer les ondes de l'une à l'autre au moyen des deux cercles concentriques.

Si l'on donne à la ligne $a'b'c'$ la longueur pour laquelle, dans l'expérience précédente, l'étincelle s'éteignait, celle-ci est, au contraire, maximum. De plus, en croisant les deux fils de la ligne $a'b'c'$ en un point de son parcours, comme l'indique la figure, on retrouve l'extinction de l'étincelle pour la *même longueur* de cette ligne. En croisant les deux fils de l'une des branches de l'appareil on renverse le sens de la force électrique; comme on rétablit ainsi la concordance des ondes qui ont parcouru des fils continus et de celles qui ont passé d'un fil primaire à un fil secondaire, le passage des ondes d'un conducteur à un autre a donc également renversé le sens de la force électrique. Ce renversement équivaut à un *changement de phase d'une demi-période*.

La longueur de la ligne $a'b'c'$, pour laquelle on observe l'extinction, était de $51^m,85$ lorsque les deux branches de l'appareil étaient continues ou lorsque l'un des systèmes d'onde passait d'un conducteur à un autre tandis que les deux fils de l'autre branche étaient croisés. L'observation de l'extinction de l'étincelle du résonateur permet de déterminer cette longueur à moins de $0^m,05$ près. Les expériences ont été faites avec des ondes de $22^m,40$ et $10^m,80$ de longueur d'onde. Il en résulte que *les ondes électriques sont transmises avec un changement de phase d'une demi-période d'un fil primaire à un fil secondaire qui lui est parallèle, de part et d'autre d'un point de force électrique nulle*.

II. — FORME DES LIGNES DE FORCE ÉLECTRIQUE.

La considération des lignes de force électrique permet de se rendre compte des résultats précédents. Une ligne de force située dans le plan des fils primaires est rectiligne et normale aux fils. Elle se propage parallèlement à elle-même et ses extrémités aboutissent en deux points en regard de chacun des fils. Cette ligne de force se présente alors tangentiellement au cercle secondaire en A' (*fig. 18*). Comme la force doit toujours être normale aux surfaces conductrices, il est nécessaire que la ligne de force, au moment où elle atteint le fil secondaire, se coupe en deux parties qui vont finir normalement à ce fil et se propagent ensuite de part et d'autre de A' . De chaque côté de ce point les extrémités des lignes de force qui aboutissent au fil secondaire sont de signe contraire; la force électrique doit donc être nulle au point A' .

Ce tracé des lignes de force, qui est imposé par la condition que la force doit être normale aux conducteurs, montre qu'en deux points en regard des cercles primaire et secondaire aboutissent les extrémités de signe contraire d'une même ligne de force; ce fait explique le changement de phase d'une demi-période éprouvé par les ondes lors de leur passage d'un fil à l'autre.

Les lignes de force se propagent entre les deux cercles jusqu'au point A du cercle primaire où la force électrique est nulle, les deux parties d'une ligne de force se resoudent alors en une ligne de force unique qui continue à se propager le long de la ligne secondaire et dont le sens est inverse de celui qu'elle avait le long des fils primaires.

En dehors du plan des fils, il y a des lignes de force formant des arcs qui aboutissent à deux points du cercle primaire équidistants de A . Certaines de ces lignes de force se propagent sans atteindre le cercle secondaire. Ce

sont elles qui, après leur arrivée au point A, reviennent en arrière et forment l'onde réfléchie le long du fil primaire.

Aux points A du cercle primaire et A' du cercle secondaire, où la force électrique est nulle, le courant est, au contraire, maximum.

Le dispositif qui sert à faire passer les ondes d'un fil à un autre est ici analogue à celui qui servirait à produire des courants induits dans une bobine placée à l'intérieur d'une bobine inductrice et ayant même axe que celle-ci. Les lois expérimentales de l'induction électromagnétique permettent de montrer par le calcul que si, dans une bobine inductrice, on fait passer un courant alternatif, le courant induit présente avec celui-ci une différence de phase comprise entre un quart de période et une demi-période. Ce retard se rapproche d'autant plus d'une demi-période que la fréquence est plus grande et l'atteint si l'on suppose cette fréquence infinie.

L'expérience m'a montré que, dans le cas de transmission des ondes électriques que je viens d'examiner, le retard est, en effet, d'une demi-période. Mais il faut remarquer qu'en toute rigueur les faits expérimentaux qui ont permis d'établir les lois de l'induction ne permettent pas d'en appliquer les conséquences à ce cas extrême. Ces lois déterminent, en effet, la valeur de la force électromotrice totale qui s'exerce sur un circuit fermé, c'est-à-dire la somme des projections de la force électrique sur les éléments de ce circuit. Lorsqu'un fil est parcouru par des ondes électriques, la force électrique étant normale au fil, la force électromotrice devient nulle. Malgré cela, on trouve ce résultat souvent observé que, des lois de l'induction et en général de toute loi physique, on peut parfois tirer des conséquences qui se trouvent applicables à des phénomènes que les faits expérimentaux, permettant d'établir ces lois, semblaient exclure.

III. — ONDES RÉFLÉCHIES LE LONG DE LA LIGNE PRIMAIRE.

Les positions d'un résonateur placé entre les fils primaires, pour lesquelles l'étincelle à la coupure est minimum, sont les mêmes lorsque le cercle primaire est seul et lorsque, le cercle secondaire étant en place, une partie des ondes est transmise à la ligne secondaire.

Cette expérience prouve qu'une partie des ondes primaires est réfléchie avec changement de sens de la force électrique, comme cela a lieu pour la totalité des ondes lorsque le fil secondaire n'existe pas.

Remarque. — Dans ces expériences, les extrémités des fils étaient réunies par un pont courbé en arc de cercle, et j'ai constaté que la longueur comptée le long du fil, entre le milieu du pont et le résonateur placé dans la position la plus rapprochée de ce pont pour laquelle l'étincelle est minimum, est un peu plus courte que si les extrémités des fils sont réunies par un pont rectiligne, comme on le fait ordinairement. Les ondes se propagent donc plus lentement le long d'un fil courbé en arc de cercle que le long de fils rectilignes. La théorie de la propagation des ondes le long des fils, qui fait prévoir une vitesse de propagation égale au coefficient de transformation des unités du système électrique en unités du système magnétique, a été, en effet, établie seulement dans le cas où le fil est rectiligne. Lorsque les ondes se propagent le long d'un fil courbé en cercle, leur vitesse peut être moindre et il est même facile de se rendre compte que si les ondes parcourent un pont circulaire réunissant les extrémités des fils de transmission, la vitesse de propagation ne peut être la même en tous les points d'une surface d'onde; les parties de l'onde qui se propagent le long des fils doivent, en effet, arriver au milieu du pont en même temps que celles qui se propagent suivant le diamètre.

Il est possible que ce soit aussi la raison pour laquelle

la longueur d'onde, mesurée au moyen de fils rectilignes, d'un résonateur, formé simplement d'un fil courbé en cercle, est supérieure au double de la longueur du résonateur.

IV. — FORME ET AMORTISSEMENT DES OSCILLATIONS SECONDAIRES.

J'ai comparé l'amortissement des ondes secondaires à celui des ondes primaires par le même procédé que pour les ondes transmises par des bouteilles de Leyde.

Les plaques de l'électromètre que j'ai décrit sont reliées respectivement à deux points en regard sur les deux fils de transmission ; les deux fils sont réunis par un pont au delà de l'électromètre. J'ai mesuré les déviations de l'électromètre pour différentes positions du pont : d'abord lorsque les fils entre l'excitateur et l'électromètre sont continus, puis lorsque, durant leur trajet, les ondes étaient transmises d'une ligne primaire à une ligne secondaire par les deux cercles concentriques.

La longueur de la ligne entre l'excitateur et l'électromètre était d'environ 100^m.

Le Tableau suivant donne les déviations de l'électromètre pour différentes positions du pont dans le cas où les ondes parcourent des fils continus.

Distances en mètres de l'électromètre au milieu du pont.	Déviations	
	de l'électromètre.	calculées.
0,0..... ^m	0,0	-4,5
0,5.....	3,5	4,9
1,0.....	14,0	14,4
1,5.....	21,0	21,0
2,0.....	23,5	23,6
2,5.....	21,5	22,6
3,0.....	19,5	19,5
3,5.....	16,5	14,9
4.....	13,2	12,7
4,5.....	11,5	11,1
5,0.....	11,0	10,9
5,5.....	11,0	11,9
6,0.....	12,7	13,3
7,0.....	15,5	15,5
8,0.....	15,5	15,5
9,0.....	14,0	14,5
10,0.....	13,0	13,9
11,0.....	13,0	14,1
12,0.....	13,5	14,4
13,0.....	13,7	14,6

La *fig.* 20 représente la courbe obtenue en prenant pour abscisses les distances du pont à l'électromètre et pour ordonnées les déviations.

J'ai montré que si les oscillations émises par l'excitateur sont pendulaires et amorties cette courbe doit être une sinusoïde amortie, dont la période est la moitié de la longueur d'onde de l'excitateur et dont le décrement logarithmique est le même que celui des oscillations électriques.

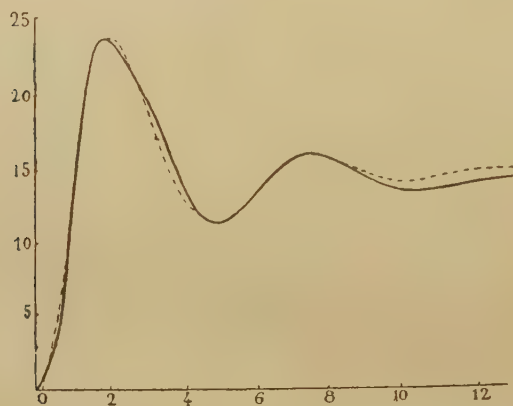
La courbe donne $\lambda = 10^m, 80$ pour la longueur d'onde; le rapport de la différence des ordonnées du second maximum et du premier minimum à la différence des ordonnées du premier maximum et du même minimum est 0,38; d'où l'on tire $\gamma = 1,9$ comme décrement logarithmique.

La courbe tracée en pointillé est calculée d'après la formule

$$D = B_1 - B e^{-\frac{2\gamma(x+x_0)}{\lambda}} \cos \left[4\pi \frac{2(x+x_0)}{\lambda} - \beta \right],$$

où $\tan \beta = \frac{\gamma}{2\pi}$, et où x_0 , retard dû à l'électromètre, est égal à 0^m,60, différence entre le quart de la longueur d'onde et l'abscisse du premier maximum.

Fig. 20.



L'accord entre les deux courbes montre que les oscillations émises par l'excitateur sont bien pendulaires.

J'ai recommencé les mêmes expériences sur des ondes transmises par les deux cercles concentriques et ai trouvé les résultats suivants :

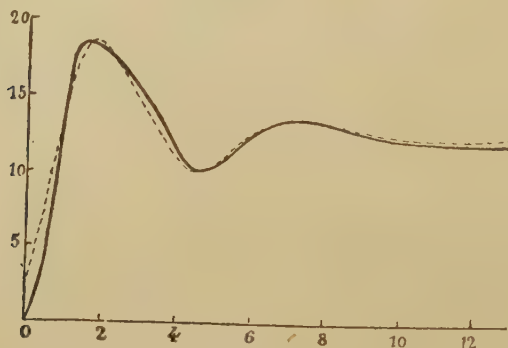
Distances en mètres de l'électromètre au milieu du pont.	Déviation de l'électro- mètre.	Déviation calculée.
0,0	0,0	2,5
0,5	4,5	9,1
1,0	14,2	14,5
1,5	18,5	17,7
2,0	18,0	18,4
2,5	17,0	16,9
3,0	15,5	14,6
3,5	13,5	12,5
4,0	12,0	11,0
4,5	10,0	10,5
5,0	10,5	10,4
5,5	11,0	11,4
6,0	12,5	12,2
7,0	13,0	13,2
8,0	12,5	12,9
9,0	12,2	12,5
10,0	12,0	12,5
11,0	12,0	12,5
12,0	12,0	12,5
13,0	12,0	12,6

La courbe construite au moyen de ces nombres donne $\lambda = 10^m, 80$ comme longueur d'onde des oscillations et 0,35 comme rapport d'amortissement; d'où l'on tire $\gamma = 2$. Le retard dû à l'électromètre est ici $0^m, 90$. La courbe tracée en pointillé a été construite en supposant les oscillations pendulaires et se rapproche beaucoup de la courbe expérimentale.

Les oscillations ont donc conservé leur forme pendulaire, en passant d'un conducteur à un autre. La longueur d'onde n'a pas été modifiée. Les valeurs du rapport d'amortissement 0,38 et 0,35 ou du décrement logarithmique 1,9 et 0,2 des ondes primaires et secondaires doivent, d'après le degré d'exactitude que peuvent comporter les expériences, être considérées comme égales.

J'ai déjà montré que la valeur du retard dû à l'électromètre est plus considérable pour les ondes secondaires, parce que celles-ci sont moins intenses que les ondes primaires.

Fig. 21.



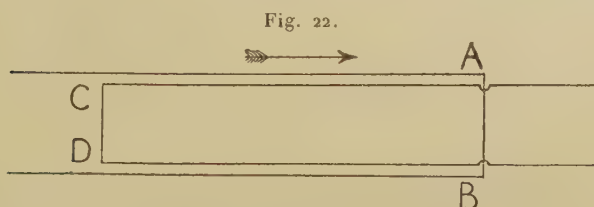
Le passage des ondes d'un fil à un autre fil parallèle au premier conserve donc au train d'ondes la forme pendulaire, et les oscillations primaire et secondaire ont la même période et le même amortissement.

V. — INTENSITÉ DES ONDES SECONDAIRES.

Comme dans le cas des ondes transmises par des bouteilles de Leyde, l'électromètre est placé à l'extrémité d'une ligne de deux fils parallèles, chacune des plaques communiquant avec l'un des fils. Je mesure les déviations de cet électromètre, d'abord lorsque les ondes parcourent depuis l'excitateur des fils continus, puis lorsque les ondes passent, durant leur trajet, d'un fil à un autre. Le rapport des déviations mesure la fraction d'énergie des ondes primaires qui est transmise au fil secondaire.

Comme pour les ondes transmises par des condensateurs, cette fraction de l'énergie est indépendante de l'intensité des ondes primaires, mais est d'autant plus grande que la longueur d'onde est plus courte.

J'ai cherché comment varie l'intensité de l'onde secondaire quand on augmente la longueur des parties parallèles des fils primaires et secondaires. Pour que cette longueur soit facile à modifier, je n'ai pas conservé aux ponts qui réunissent les extrémités des lignes la forme de cercles concentriques. Les fils primaires distants de 10^{cm} sont réunis par un pont rectiligne AB (*fig. 22*), les fils secon-



dares sont parallèles aux fils primaires sur une certaine longueur et leurs extrémités sont réunies par un pont CD. La distance d'un fil primaire au fil secondaire voisin est d'environ $0^{\text{cm}}, 5$.

Pour mesurer la déviation de l'électromètre produite par les ondes qui se propagent le long des conducteurs continus, je supprime les deux ponts et attache l'un contre l'autre les deux fils dans les parties où ils sont parallèles et voisins.

La longueur d'onde était $10^{\text{m}}, 80$. J'ai indiqué, dans le Tableau suivant, les déviations de l'électromètre lorsque les fils primaire et secondaire sont réunis, ou lorsque ceux-ci sont isolés l'un de l'autre et les ponts en place. Le rapport des déviations dans les deux cas mesure la fraction d'énergie transmise.

Longueur des parties parallèles AC et BD des deux lignes.	Déviations de l'électromètre.		Fraction de l'énergie transmise.
	Ondes primaires.	Ondes secondaires.	
0,50.....	24,5	7,5	0,30
1,06.....	24,5	14,5	0,59
1,50.....	25,5	17,0	0,66
2,12.....	24,5	18,5	0,75
$\left(\frac{\lambda}{4}\right)$ 2,70.....	25,5	20,5	0,80
3,20.....	25,0	19,0	0,76
3,90.....	25,0	15,0	0,60
4,25.....	25,5	15,0	0,58

Ce Tableau montre que *l'intensité des ondes secondaires est maximum quand la longueur des fils parallèles, de chaque côté du milieu du pont AB, est égale à un quart de longueur d'onde*. Le pont CD, qui réunit les extrémités de la ligne secondaire, se trouve alors au point où la force électrique due à l'onde primaire et la force électrique due à l'onde réfléchie sont constamment de même sens.

J'ai trouvé le même résultat lorsque les extrémités des fils de chacune des lignes ne sont pas réunies par des ponts, mais il résulte de la comparaison des résultats, dans les deux cas, que les ondes secondaires sont plus intenses lorsque les extrémités des fils ne sont pas réunies.

Si les extrémités des fils de l'une des lignes seulement sont réunies, les ondes secondaires sont extrêmement peu intenses, même si les fils sont parallèles sur une grande longueur.

Pour obtenir des ondes secondaires le long d'une ligne tendue dans le prolongement de la ligne primaire, il faut donc se placer dans l'un des deux cas que j'ai étudié dans les Chapitres précédents.

Si les extrémités des fils de la ligne primaire sont libres, les extrémités des fils de la ligne secondaire doivent l'être

également; si un pont réunit les fils de la ligne primaire il doit y avoir également un pont entre les fils de la ligne secondaire.

Des expériences que j'ai décrites dans ce Chapitre il résulte en résumé que : si un fil secondaire est parallèle à un fil primaire de part et d'autre d'un point où la force électrique est nulle, un train d'ondes pendulaires et amorties est transmis au fil secondaire avec changement de sens de la force électrique et sans modification de la période et de l'amortissement.

L'intensité des ondes secondaires est maximum quand, de chaque côté du point de force électrique nulle, les fils sont parallèles et voisins sur une longueur égale au quart de la longueur d'onde.

TROISIÈME PARTIE.

ACTION D'UN FIL PARCOURU PAR DES ONDES PROGRESSIVES SUR UN FIL SECONDAIRE.

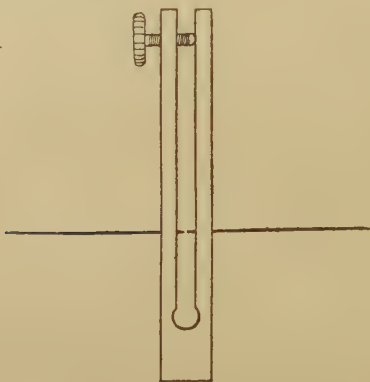
Dans les deux cas de transmission des ondes que j'ai examinés, les fils primaires ne continuaient pas au delà de la région où les ondes étaient transmises au conducteur secondaire. La partie des ondes primaires qui ne passait pas aux fils secondaires devait nécessairement rebrousser chemin. J'ai étudié, aussi, ce qui arrive lorsque le fil primaire passe au voisinage d'un fil secondaire, puis continue dans la même direction.

I. — RÉSONATEUR RECTILIGNE.

Les ondes se propageant le long d'un fil rectiligne très long, quelle est leur action sur un bout de fil secondaire rectiligne?

Pour observer ce qui se passe le long du fil secondaire, j'en ai fait une sorte de résonateur. J'ai coupé en son milieu une tige de cuivre de 2^{mm} de diamètre, ayant 50^{cm} de longueur et j'ai fixé les deux moitiés bout à bout, dans le prolongement l'une de l'autre, à chacune des branches d'une pince de bois (*fig. 23*). L'une des deux extrémités en

Fig. 23



regard est limée en pointe et l'autre coupée suivant une section droite de façon à constituer un micromètre à étincelles. En écartant les deux branches de la pince au moyen d'une vis, on peut obtenir des variations très petites de la largeur de la coupure. Cette disposition présente ici sur les micromètres à étincelles ordinairement employés l'avantage capital de permettre de faire varier les dimensions de la coupure sans attacher au résonateur aucun conducteur ou aucune vis et d'obtenir ainsi un résonateur rigoureusement formé par un fil rectiligne.

Si le résonateur est *parallèle au fil* de transmission des ondes, il est impossible d'obtenir *aucune étincelle à la coupure*, même en rapprochant le résonateur du fil aussi près qu'on le peut, sans qu'il jaillisse d'étincelles entre eux.

Les étincelles apparaissent à la coupure aussitôt qu'on

inclina un peu le résonateur par rapport au fil de transmission des ondes. Elles atteignent une longueur maximum quand le fil et le résonateur sont perpendiculaires, ce dernier ayant l'une de ses extrémités près du fil. Si, au lieu d'être parcouru par des ondes hertziennes, le fil était traversé par un courant électrique d'intensité lentement variable, les lois de l'induction électromagnétique indiquent qu'au contraire l'action sur un fil rectiligne serait maximum lorsque les deux conducteurs sont parallèles. En tenant compte du fait que, dans un champ hertzien, la force électrique est normale au conducteur, on explique facilement le résultat de l'expérience. Les ondes, le long du fil primaire, sont constituées par des lignes de force électrique rectilignes normales au fil, dont l'une des extrémités se propage sur ce fil et l'autre sur les parois de la chambre où se fait l'expérience. Lorsque ces lignes de force atteignent l'extrémité du résonateur placé parallèlement au fil, elles se coupent et les deux extrémités de signe contraire ainsi rendues libres se propagent le long du résonateur en restant toutes deux sur une même section droite du fil qui le constitue. Il en résulte qu'à chaque instant le nombre des extrémités positives et celui des extrémités négatives des lignes de force qui aboutissent sur une même section droite du résonateur sont égaux. Par suite du passage des ondes électriques, l'intensité de la force électrique varie; il se produit des courants le long des génératrices du fil du résonateur, mais ces courants sont égaux et inverses le long des génératrices situées du côté du fil primaire et le long des génératrices situées du côté opposé. En arrivant à la coupure, ces courants s'annulent mutuellement et ne peuvent y produire d'étincelles.

Quand le résonateur est perpendiculaire au fil de transmission, les lignes de force se présentent, au contraire,

parallèlement à ce résonateur ; elles doivent se couper pour pouvoir aboutir normalement à sa surface, mais les deux extrémités rendues libres ne se propagent plus le long d'une même section droite. Je décrirai plus loin un tracé de lignes de force électrique analogue à celui qui se rencontre ici.

Le résonateur étant parallèle aux fils de transmission des ondes, les nombres des lignes de force qui ont leurs extrémités de signe contraire sur une même section droite ne sont plus nécessairement égaux si l'on modifie la forme du champ en approchant un conducteur, la main par exemple, du résonateur. Il en est de même si le résonateur n'est pas rigoureusement formé d'un fil rectiligne et que l'on détruit la symétrie autour de son axe en y attachant un prolongement métallique normal à sa direction ; c'est pourquoi toute disposition servant à régler la coupure, au moyen d'une vis micrométrique fixée au résonateur, ne peut permettre d'observer la disparition totale des étincelles, lorsque ce dernier est parallèle au fil de transmission des ondes.

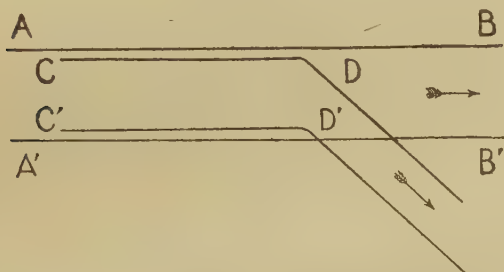
Je vais justement étudier les ondes secondaires qui peuvent être produites le long d'un fil d'abord parallèle au fil primaire sur une certaine longueur, mais s'en écartant ensuite à angle droit.

II. — ONDES TRANSMISES SANS CHANGEMENT DE PHASE.

Une ligne primaire AB, A'B' (*fig.* 24) est formée de deux fils parallèles tendus l'un au-dessus de l'autre à une distance de 10^{cm}. Deux fils secondaires CD, C'D' sont parallèles et voisins des fils primaires sur une certaine longueur, puis en DD' se recourbent en avant à angle droit. Des ondes secondaires se produisent le long de ces

fil. Pour savoir si les ondes primaires et secondaires sont concordantes lorsqu'elles se séparent en DD' , je fais agir sur un même résonateur ces deux systèmes d'ondes. A 50^m du point où ils se séparent, les lignes primaire et secondaire se terminent par des ponts parallèles chacun à l'un des côtés opposés d'un résonateur rectangulaire; les effets des ondes sur le résonateur se retranchent si elles y arrivent en concordance. On peut faire varier la longueur de l'une des lignes en intercalant sur chacun de ces fils un tube de laiton et une tige qui glisse dans ce tube, ainsi que je l'ai

Fig. 24.



fait dans des expériences déjà décrites. Je détermine la longueur de la ligne primaire pour laquelle les étincelles à la coupure du résonateur s'éteignent, c'est-à-dire pour laquelle les ondes arrivent en concordance au résonateur. On trouve qu'alors les lignes primaire et secondaire ont la même longueur à partir du point où elles se séparent. Les ondes primaires sont donc transmises *sans changement de phase* à la ligne secondaire.

Comme vérification, j'ai réuni les fils primaires aux fils secondaires correspondants en C et D et en C' et D'; les deux lignes primaire et secondaire étant alors réunies au point où elles se séparent, les ondes sont nécessairement concordantes en ce point. J'ai trouvé qu'il fallait donner

à la ligne primaire, pour éteindre l'étincelle, la même longueur que dans l'expérience précédente.

A l'aide de l'électromètre placé à l'extrémité de la ligne secondaire, j'ai mesuré l'intensité des ondes pour différentes longueurs des parties parallèles des deux lignes. L'onde secondaire a une intensité maximum quand un fil primaire et le fil secondaire correspondant sont parallèles sur une longueur égale au quart de la longueur d'onde.

III. — ONDES TRANSMISES AVEC UN CHANGEMENT DE PHASE D'UNE DEMI-PÉRIODE.

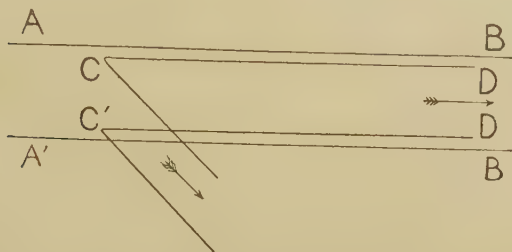
Si l'on répète ces expériences en réunissant par un pont les extrémités D, D' des fils secondaires, l'étincelle du résonateur, au lieu de s'éteindre, devient au contraire maximum quand les ondes ont parcouru des longueurs égales à partir du point où elles se séparent. On observe, au contraire, une extinction de l'étincelle pour ces mêmes longueurs si l'on renverse le sens de la force électrique des ondes primaires au delà du point où les deux lignes se séparent, ce qui peut se faire en croisant les deux fils de la ligne. Pour que les ondes arrivent en concordance au résonateur, après avoir parcouru des longueurs égales, il faut renverser le sens de l'un des systèmes d'ondes, ce qui prouve que les ondes primaires et secondaires ont une *différence de phase d'une demi-période* au point où elles se séparent.

L'intensité des ondes secondaires est encore maximum lorsque le fil primaire et le fil secondaire correspondant sont parallèles sur une longueur égale à un quart de longueur d'onde.

Si, au lieu de séparer les fils primaires et secondaires du côté des fils CD, C'D' (*fig. 25*) qui est le plus éloigné de

l'excitateur, on attache, au contraire, la ligne secondaire aux extrémités C, C' les plus rapprochées de l'excitateur, les ondes primaires et secondaires sont toujours concor-

Fig. 25.



dantes aux points C, C' où les fils se séparent, et cela qu'il y ait ou non un pont à l'extrémité DD' des fils secondaires.

Les ondes secondaires sont moins intenses que si on les prend du côté opposé à l'excitateur.

QUATRIÈME PARTIE.

SUR LA FORME DES LIGNES DE FORCE ÉLECTRIQUE DANS LE VOISINAGE D'UN RÉSONATEUR.

J'ai cherché à me rendre compte, en explorant le champ hertzien, de ce qui se passe quand le conducteur secondaire auquel les ondes sont transmises est un résonateur.

Pour déterminer la direction de la force électrique en un point du champ hertzien, j'ai employé un appareil analogue au cohéreur utilisé par M. J.-C. Bose ⁽¹⁾ pour

(¹) J.-C. BOSE, *Phil. Mag.*, t. XLIII, p. 55; janvier 1897.

recéler la présence d'ondes électriques. Dans une rainure formée en collant sur une lame de verre deux morceaux de tige de verre parallèles à 3^{mm} l'un de l'autre, j'ai placé alternativement des fragments de ressorts à boudin en fil de laiton légèrement oxydé et de petites olives en laiton (*fig. 26*). Les ressorts et les olives sont placés côte à côte

Fig. 26.



dans la rainure, les axes des ressorts et des olives sont perpendiculaires à la rainure, de sorte que les ressorts touchent par leur surface convexe la partie renflée des olives. Une vis à filets fins, munie d'une tête en ébonite et tournant dans un écrou de bois, permet de serrer les olives et les ressorts entre deux morceaux de cuivre dont l'un est fixe et dont l'autre, poussé par la pointe de la vis, glisse dans la rainure. Les ressorts et les olives sont recouverts par une plaque de verre qui les empêche de se soulever quand on serre la vis. La file de ressorts a 3^{cm} de long. Le récepteur isolé devient conducteur lorsqu'on le soumet à l'action d'un champ hertzien ; quelques secousses lui rendent sa résistance primitive. Entre un ressort et une olive, le contact est plus régulier qu'entre deux ressorts, de sorte que la sensibilité est plus constante que si l'on n'emploie que des ressorts ; elle est aussi moins grande, ce qui, pour les expériences que je vais décrire, est un avantage.

Deux gouttes de mercure, placées dans des cavités creusées dans les morceaux de cuivre qui terminent la file de ressorts, permettent d'intercaler le cohéreur, sans le secouer, dans un circuit comprenant un électromètre capillaire et une force électromotrice d'environ $\frac{4}{10}$ de volt.

Lorsqu'on fait agir les ondes, le cohéreur est supporté horizontalement à l'extrémité d'une tige de verre et séparé du circuit; on rétablit ensuite les communications avec l'électromètre pour observer sa conductibilité.

Ayant placé le cohéreur entre deux plaques métalliques verticales, parallèles et en regard, attachées respectivement aux extrémités de deux fils transmettant des ondes, j'ai constaté que, si la sensibilité est convenablement réglée au moyen de la vis, il ne devient pas conducteur toutes les fois que la file de ressorts est parallèle au plan des plaques; il le devient, au contraire, si elle leur est perpendiculaire. On en conclut que l'action sur le cohéreur est la plus faible possible lorsque celui-ci est normal à la direction de la force électrique. C'est ce que j'ai déjà constaté en me servant d'un résonateur rectiligne, ainsi que je l'ai montré dans le Chapitre précédent.

De là, un moyen de trouver la direction de la force électrique en un point d'un champ hertzien : on cherche deux directions suivant lesquelles le récepteur ne devient pas conducteur, la normale au plan ainsi déterminé est la direction de la force électrique.

On peut vérifier par ce procédé que les lignes de force électrique sont bien normales à un fil rectiligne le long duquel se propagent des ondes.

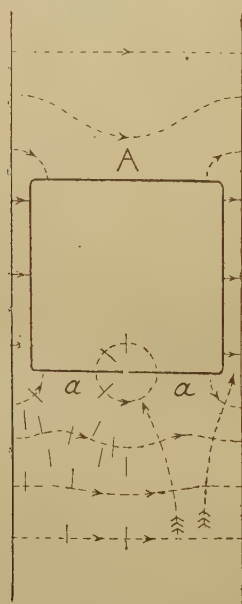
J'ai exploré le champ aux environs de la coupure d'un résonateur carré de $0^m,50$ de côté, placé entre deux fils transmettant des ondes dans le plan horizontal de ces fils (*fig. 27*). En tout point du plan du résonateur, la force électrique est, par raison de symétrie, située dans ce plan; il suffit donc d'y chercher la direction pour laquelle le cohéreur ne devient pas conducteur; la direction perpendiculaire est celle de la force électrique. D'après le théorème de Poynting, le cohéreur lui-même sera orienté suivant la direction de propagation de l'énergie.

On peut déterminer un angle d'environ 30° dans lequel le cohéreur ne devient pas conducteur : c'est la bissectrice de cet angle qui doit être considérée comme la direction de propagation de l'énergie.

J'ai trouvé ainsi que :

1° Loin du résonateur les lignes d'énergie sont parallèles aux fils de transmission et, par suite, les lignes de force normales à ces fils.

Fig. 27



2° Au voisinage du résonateur les lignes d'énergie se séparent en deux faisceaux. L'un de ces faisceaux converge à la coupure ; les lignes de force correspondantes forment alors des arcs dont les extrémités sont sur le résonateur de part et d'autre de la coupure. Les lignes d'énergie qui se propagent près des fils de transmission se rap-

prochent au contraire de ces fils et vont pénétrer dans l'espace situé entre eux et les côtés parallèles du résonateur. Il y a des régions (a) entre les deux faisceaux où il est impossible de trouver l'orientation des lignes d'énergie. La figure montre qu'il y a dans ces régions, à la surface du résonateur, un point de part et d'autre duquel la force électrique a des directions inverses; la force électrique en ce point doit donc être nulle. Les lignes de force se présentent tangentielllement au résonateur en ces points, puis se scindent en deux parties qui se raccordent normalement à la surface du résonateur. On retrouve ici, à la surface du conducteur secondaire, des points de force électrique nulle. M. Poincaré ⁽¹⁾ a montré que l'intensité des oscillations du résonateur dépend justement de la position par rapport à la coupure des points où la force électrique se présente tangentielllement au résonateur.

3° A l'intérieur du résonateur les lignes d'énergie divergent à partir de la coupure, mais la force électrique y est moins intense qu'à l'extérieur et il est nécessaire, pour explorer l'intérieur du résonateur, d'augmenter la sensibilité du cohéreur; une partie de l'énergie qui converge à la coupure y est donc absorbée.

Les lignes de force qui se propagent de part et d'autre du résonateur ont l'une de leurs extrémités à la surface de ce dernier jusqu'au point A diamétralement opposé à la coupure. En ce point se retrouvent les extrémités de signe contraire des lignes de force qui ont passé de chaque côté du résonateur; la force électrique y est nulle.

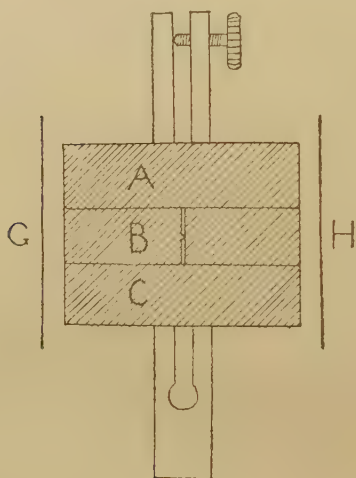
On peut prévoir que la convergence des lignes d'énergie à la coupure est une condition nécessaire pour que le résonateur fonctionne. A l'étincelle a lieu, en effet, une transformation de l'énergie électromagnétique en chaleur,

(1) H. POINCARÉ, *Les oscillations électriques*, p. 240.

lumière, etc. ; l'étincelle ne peut donc se produire que là où il y a afflux d'énergie.

Dans le Chapitre précédent, j'ai montré qu'un résonateur rectiligne placé parallèlement à un fil transmettant des ondes ne donne pas d'étincelles et que les lignes de force électrique ne sont pas dans ce cas sensiblement dé-

Fig. 28.



formées par la présence du résonateur ; les lignes d'énergie passent alors le long du résonateur sans converger à la coupure. Si, au contraire, le résonateur est normal au fil de transmission, les lignes de force prennent des formes analogues à celles que je viens de décrire, l'énergie converge à la coupure où il se produit des étincelles.

On peut montrer que si l'on empêche l'énergie de converger entre les deux bords du micromètre à étincelles d'un résonateur, celui-ci ne donne plus d'étincelles. Dans ce but, j'ai remplacé sur 2^m de long les deux fils de transmission des ondes par des bandes de zinc G, H (*fig.* 28)

ayant 20^{cm} de hauteur dont les plans sont parallèles et verticaux. Un résonateur est constitué de la manière suivante : une plaque de cuivre est coupée en trois bandes parallèles AB et C. La bande du milieu est coupée en son milieu ; une petite pointe ménagée sur les bords de cette coupure sert avec le bord en regard du micromètre à étincelles. Les deux autres bandes jouent un rôle analogue à celui de l'anneau de garde de condensateur. Pour assurer la protection, ces plaques recouvrent un peu les bords du résonateur sans les toucher. Je place ce résonateur entre les deux bandes métalliques GH le long desquelles se propagent les ondes, son plan étant vertical et perpendiculaire au plan de ces bandes. J'ai constaté que le résonateur ne donne que de très petites étincelles lorsque les plaques de garde sont en place ; lorsqu'elles sont enlevées les étincelles deviennent au contraire très vives. L'explication est la suivante : le résonateur et les rubans sont trois plans verticaux ; il en résulte qu'à la hauteur du résonateur et grâce aux plaques de garde les lignes de force électrique et les lignes d'énergie sont planes et horizontales. L'énergie qui se propage dans une tranche très étroite à la hauteur du micromètre à étincelles peut seule y arriver, ce qui explique pourquoi les étincelles sont très faibles. Lorsque les plaques de garde sont enlevées, l'énergie converge au contraire de tous côtés vers l'étincelle qui est alors beaucoup plus forte.

RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS.

Dans les expériences que j'ai décrites dans la première Partie de ce travail, des ondes électriques se propagent le long d'un fil primaire dont l'extrémité est reliée à l'une des armatures d'un condensateur, un fil secondaire tendu

dans le prolongement du premier est attaché à l'autre armature. J'ai montré que les ondes électriques passent sans changement de phase d'un fil à l'autre; que les oscillations primaires et secondaires ont la même période et le même amortissement, qu'enfin l'intensité des ondes secondaires ne dépend pas uniquement de la capacité du condensateur qui sert à faire passer les ondes d'un conducteur à l'autre.

J'ai expliqué les résultats des expériences en établissant le tracé des lignes de force électrique dans la région où les ondes passent d'un fil à l'autre et j'ai constaté l'existence à la surface du conducteur secondaire de points où la force électrique est nulle. Les lignes de force se coupent en ces points en donnant naissance à deux systèmes d'ondes, l'un réfléchi le long du fil primaire, l'autre transmis au fil secondaire.

Dans la seconde Partie, j'ai étudié les ondes secondaires produites le long d'un fil parallèle au fil primaire de part et d'autre d'un point où la force électrique est nulle. Ces ondes sont transmises d'un fil à l'autre avec changement de sens de la force électrique et sans modification de la période ni de l'amortissement. L'intensité des ondes secondaires est maximum si, de part et d'autre du point de force électrique nulle, les deux fils sont parallèles sur une longueur égale au quart de la longueur d'onde.

Dans la troisième Partie, des ondes progressives se propagent le long d'une ligne rectiligne très longue et agissent sur des conducteurs secondaires voisins de cette ligne, dans une région éloignée de son extrémité. J'ai montré que l'on peut, selon les cas, obtenir des ondes secondaires avec ou sans changement de sens de la force électrique.

Enfin, dans la dernière Partie, j'ai déterminé la forme des lignes de force électrique aux environs d'un résonateur; j'ai trouvé qu'il existe le long de ce dernier des points où

la force électrique est nulle et montré que si des étincelles jaillissent à la coupure une partie de l'énergie y converge nécessairement.

Vu et approuvé :

Paris, le 24 mai 1899.

LE DOYEN DE LA FACULTÉ DES SCIENCES,

G. DARBOUX.

Vu et permis d'imprimer :

Paris, le 24 mai 1899.

LE VICE-RECTEUR DE L'ACADÉMIE DE PARIS,

GRÉARD.

TABLE DES MATIÈRES.

PREMIÈRE PARTIE.

PASSAGE DES ONDES DE L'EXTRÉMITÉ D'UN FIL PRIMAIRE A L'EXTRÉMITÉ D'UN FIL SECONDAIRE TENDU DANS LE PROLONGEMENT DU PREMIER.....	3
I. Phase des ondes secondaires.....	4
II. Forme des lignes de force du champ hertzien dans la région où les ondes quittent le conducteur primaire pour passer à la surface du conducteur secondaire.....	13
III. Étude de quelques dispositions expérimentales qui permettent de transmettre les ondes au fil secondaire.....	20
IV. Ondes réfléchies le long du fil primaire.....	23
V. Forme et amortissement des oscillations secondaires.....	24
VI. Intensité des oscillations secondaires.....	35

DEUXIÈME PARTIE.

PASSAGE DES ONDES ÉLECTRIQUES D'UN FIL PRIMAIRE A UN FIL SECONDAIRE, QUI LUI EST PARALLÈLE DE PART ET D'AUTRE D'UN POINT OU LA FORCE ÉLECTRIQUE EST NULLE.....	45
I. Phase des oscillations secondaires.....	46
II. Forme des lignes de force électrique.....	49
III. Ondes réfléchies le long de la ligne primaire.....	51
IV. Forme et amortissement des oscillations secondaires.....	52
V. Intensité des oscillations secondaires.....	56

TROISIÈME PARTIE.

ACTION D'UN FIL PARCOURU PAR DES ONDES PROGRESSIVES SUR UN FIL SECONDAIRE.....	59
I. Résonateur rectiligne.....	59
II. Ondes transmises sans changement de phase.....	62
III. Ondes transmises avec changement de phase d'une demi-période.....	64

QUATRIÈME PARTIE.

SUR LA FORME DES LIGNES DE FORCE ÉLECTRIQUE DANS LE VOISINAGE D'UN RÉSONATEUR.....	65
Résumé et conclusions.....	71

•

SECONDE THÈSE.

PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Historique de la liquéfaction des gaz.

Vu et approuvé :

Paris, le 24 mai 1899.

LE DOYEN DE LA FACULTÉ DES SCIENCES,

G. DARBOUX.

Vu et permis d'imprimer :

Paris, le 24 mai 1899.

LE VICE-RECTEUR DE L'ACADÉMIE DE PARIS,

GRÉARD.

